



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## VÝROBA TVÁRNÍKU FORMY

PRODUCTION OF THE MOLD PLUNGER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Rosa

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Osička, Ph.D.

BRNO 2017

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Jakub Rosa**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Karel Osička, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Výroba tvárníku formy

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor možností výroby tvárníku formy jako náhradního dílu podle originálu součástky se zaměřením na nekonvenční technologie.

### Cíle diplomové práce:

Rozbor současného stavu používaných forem, výběr problémové formy.  
Rozbor originálu tvárníku z hlediska použitého materiálu a integrity povrchu.  
Posouzení technologičnosti dílu a vypracování konstrukčního návrhu vložky.  
Návrh dostupné technologie pro výrobu.  
Realizace vzorku.  
Vyhodnocení vzorku a porovnání s originálem.  
Ekonomické vyhodnocení.  
Diskuze výsledků.

### Seznam literatury:

AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM Publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

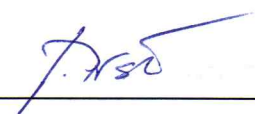
MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

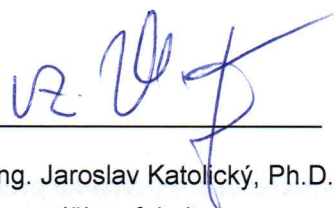
BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Smyslem diplomové práce je vytvoření náhradního tvárníku vstřikovací formy vhodnou metodou podle původního tvárníku tak, aby konečný výlisek splňoval požadované parametry povrchu. Práce je zaměřena na analýzu původního tvárníku a na experimentální ověření vhodných metod výroby ekvivalentu tvárníku.

### Klíčová slova

Elektroerozivní obrábění, forma, tvárník, vstřikování plastů, textura

## ABSTRACT

The meaning of the diploma thesis is to create a new mold plunger for injection mold using a suitable method according to the original mold plunger. The final mold part should meet the required surface parameters. The work is focused on the analysis of the original mold plunger and the experimental verification of suitable methods of production of the equivalent mold plunger.

### Key words

Electrical discharge machining, mold, mold plunger, injection molding, texture

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ROSA, Jakub. *Výroba tvárníku formy*. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 61 s. 8 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Výroba tvárníku formy** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Bc. Jakub Rosa

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D., dále prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc., z VUT Brno, Mgr. Janě Jurmanové, Ph.D., Mgr. Bohumile Tesaříkové, Mgr. Pavlu Součkovi, Ph.D. z MUNI Brno a panu Pavlu Psotovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytli při vypracování diplomové práce. Dále děkuji rodině, přátelům a všem, kteří mne podporovali v mém studiu.

## OBSAH

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ .....	6
PODĚKOVÁNÍ.....	7
OBSAH.....	8
ÚVOD .....	10
1 TEORETICKÝ ÚVOD .....	11
1.1 Nekonvenční metody obrábění.....	11
1.2 Základní charakteristiky nekonvenčních metod obrábění .....	11
1.3 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění .....	12
1.3.1 Elektroerozivní obrábění .....	12
1.3.2 Obrábění paprskem laseru .....	16
1.4 Struktura povrchu nekonvenčních metod obrábění .....	19
2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU FOREM, VÝBĚR PROBLÉMOVÉ FORMY.....	21
2.1 Specifikace výlisku .....	21
2.2 Rozbor současného stavu forem .....	21
2.3 Výběr problémové formy .....	24
3 ROZBOR ORIGINÁLU TVÁRNÍKU Z HLEDISKA POUŽITÉHO MATERIÁLU A INTEGRITY POVRCHU .....	25
3.1 Určování materiálu vložek .....	25
3.1.1 Vložka frosted 20° .....	25
3.1.2 Vložka forsted 5° .....	31
3.1.3 Materiál vložek .....	34
3.2 Měření drsnosti povrchu vložek .....	35
3.2.1 Konfokální laserový mikroskop.....	35
3.2.2 Drsnoměr TR100 SRT.....	36
3.2.3 Měření drsnosti vložky frosted 20° .....	36
3.2.4 Měření drsnosti vložky frosted 5° .....	37
3.2.5 Výpočty statistických veličin pro hodnoty naměřené dotykovým drsnoměrem TR100 SRT .....	39
4 POSOUZENÍ TECHNOLOGIČNOSTI DÍLU, VYPRACOVÁNÍ KONSTRUKČNÍHO NÁVRHU VLOŽKY .....	44
4.1 Konstrukční návrh vložky.....	44
5 NÁVRH DOSTUPNÉ TECHNOLOGIE PRO VÝROBU .....	45
5.1 Výběr technologie.....	45
5.2 Výběr materiálu .....	45



---

6	REALIZACE VZORKU .....	46
6.1	Realizace vzorků vložených do formy s frosted texturou.....	46
6.2	Realizace vzorků optik.....	47
7	VYHODNOCENÍ VZORKŮ A POROVNÁNÍ S ORIGINÁLEM.....	48
7.1	Princip přístroje.....	49
7.2	Vyhodnocení vzorků .....	50
7.2.1	Vyhodnocení pokusu 1 .....	51
7.2.2	Vyhodnocení pokusu 2.....	52
8	EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ .....	54
9	DISKUZE.....	55
9.1	Návrhy dalších možných kroků.....	56
	ZÁVĚR .....	57
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	58
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	60
	SEZNAM PŘÍLOH .....	61

## ÚVOD

Pod slovem forma si lze z hlediska strojírenských technologií představit různé nástroje. Tato práce se zaměřuje na formy pro vstřikování plastů.

V dnešní době nás plastové výrobky obklopují ze všech stran a život si bez nich nedokážeme vůbec představit. Na vývoj a výrobu nových plastových dílů a součástí je vytvářen velký tlak, zejména z hlediska času navržení nových vstřikovacích forem, z hlediska technologické přípravy a jejich výroby a zejména pak z hlediska dodání finálních kusů výrobním podnikem. To má za následek zrychlený vývoj a výrobu vstřikovacích forem, a to často na úkor kvality vstřikovacího nástroje.

Ocelové vstřikovací formy se obvykle vyrábí různými způsoby obrábění, ovšem požadavky na tvarovou složitost finálního plastového vylisku jsou důvodem k využívání převážně nekonvenčních způsobů obrábění, a to zejména elektroerozivní hloubení a drátové řezání. Protože ze vstřikovací formy vychází konečný výrobek, který se už dále téměř neopravává, je důležitým prvkem povrchová úprava tvárníků vstřikovací formy, zejména pak tvárníků, které vytvářejí pohledovou část finálního plastového vylisku. Cena vstřikovací formy se obvykle pohybuje v řádech statisíců korun z důvodu složitosti konstrukce, výroby a požadavků na dlouhou životnost. Proto velmi důležitou roli hraje správné zacházení s formou a dobrá údržba i skladování nástroje.

Smyslem této práce je nalezení vhodné metody, kterou lze vyrobit nové tvárníky jako náhradu za stávající poškozené. Tyto tvárníky vytvářejí na finálním plastovém vylisku speciální povrch. Vylisky jsou tzv. optiky, které tvarují světlo LED diod. Tyto optiky nacházejí v dnešní době hojné využití v různých aplikacích, například v kapesních svítilnách, scénických reflektorech, vnitřním osvětlení dopravních prostředků apod.

## 1 TEORETICKÝ ÚVOD

### 1.1 Nekonvenční metody obrábění

Nekonvenční metody obrábění nepoužívají klasický řezný nástroj specifikovaný nástrojovými úhly a pracovními rovinami. Nedochází tu převážně k úběru klasické třísky mechanickou prací jako u konvenčních metod obrábění, ale jedná se o využití fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálu nebo jejich kombinací [1-6].

Důvody vzniku nekonvenčních metod obrábění a jejich neustálého rozšiřování v průmyslové výrobě jsou tyto [3,4]:

- používání a vývoj těžkoobrobitelných materiálů v konstrukci strojů a nástrojů (žáruvzdorné a žárupevné oceli, kalené oceli a litiny, kompozitní materiály, keramické materiály, slitiny kovů, atd.),
- možnost obrábět tvarově složité plochy (vnější i vnitřní) a to s vysokou tvarovou i rozměrovou přesností (např. pro tvorbu nástrojů, forem, zápusťek, měřicí techniky, atd.),
- výroba miniaturních, přesných součástí pro informační a řídicí techniku, vyšetřovací sondy v medicíně apod.,
- využití a implementace CAD a CAM systémů v automatizovaných provozech.

### 1.2 Základní charakteristiky nekonvenčních metod obrábění

Metody nekonvenčního způsobu obrábění charakterizuje velký rozsah různých parametrů z hlediska různých technologických podmínek i z hlediska výstupů příslušných procesů [6].

Základní charakteristiky jsou [2,3,6]:

- rychlost, výkonnost a možnosti obrábění nejsou závislé na mechanických vlastnostech obráběného materiálu,
- nástroj pro nekonvenční obrábění nemusí být z tvrdšího materiálu než obrobek – zvlášť tvrdé materiály se dají obrábět nástroji z měkkých materiálů,
- lze obrábět tvarově složité otvory a dutiny, díry se zakřivenou osou i do materiálů s vysokou tvrdostí,
- současně s výrobou tvaru dochází u některých nekonvenčních metod obrábění k řízené změně vlastností povrchové vrstvy, zejména zvýšení odolnosti proti korozi, zvýšení únavové pevnosti apod.

### 1.3 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Podle převládajícího účinku oddělování materiálu můžeme rozdělit nekonvenční metody obrábění na [2,6]:

**a) oddělování materiálu tepelným účinkem:**

- elektroerozivní obrábění,
- obrábění paprskem plazmy,
- obrábění paprskem laseru,
- obrábění paprskem elektronů.

**b) oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem**

- elektrochemické obrábění,
- chemické obrábění.

**c) oddělování materiálu mechanickým účinkem**

- ultrazvukové obrábění,
- obrábění paprskem vody.

#### 1.3.1 Elektroerozivní obrábění

Pod elektroerozivní obrábění spadá řada různých nekonvenčních obráběcích metod, které mají společné to, že úběr obráběného materiálu se provádí elektrickými nebo obloukovými výboji, které se periodicky opakují. Výboje probíhají mezi anodou (nástroj) a katodou (obrobek). Z obrobku jsou tavením a odpařováním odebírány mikro částice, které jsou z místa obrábění vyplavovány dielektrickou kapalinou. Jiskrová mezera mezi elektrodami má velikost 0,01 až 0,5 mm. Proces obrábění materiálu je složen ze střídavých impulsních výbojů, které jsou statisticky rozloženy po celé ploše nástrojové elektrody. Oddělení obráběného materiálu je způsobeno výsledky výboje mezi elektrodami. Nejprve dojde ke vzniku krátkodobé koncentrace elektrické a mechanické energie elektronů na anodě (obrobku), dále ke vzniku vysoké teploty (až 12 000 °C) v blízkosti výboje a natavení i odpaření materiálu obrobku ale i nástroje. Výboj vzniká v místě nejsilnějšího elektrického napětového pole, které vytváří ionizovaný (vodivý) kanál, který umožňuje přechod jiskry mezi nástrojem a obrobkem (obr. 1). Výboje způsobuje stejnosměrný proud, který je dodáván do pracovního okruhu v pulzech s obdélníkovým průběhem. Natavený materiál je uvolňován do dielektrické kapaliny a v důsledku přerušení proudu je vyplavován z místa odtavení. Nástroj je díky posuvovému mechanismu stále přibližován k obráběné ploše a současně i kmitá. Kmitavý pohyb zlepšuje podmínky pro výboj a usnadňuje odplavování částic z jiskrové mezery [1-6].

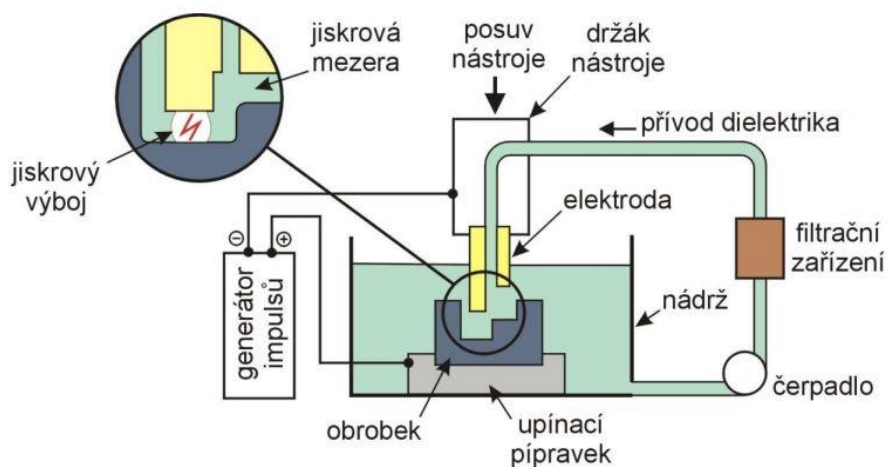
**Elektroerozivní obrábění se dělí na [2,6]:**

- elektrojiskrové obrábění,
- elektrokontaktní obrábění,
- anodomechanické obrábění.

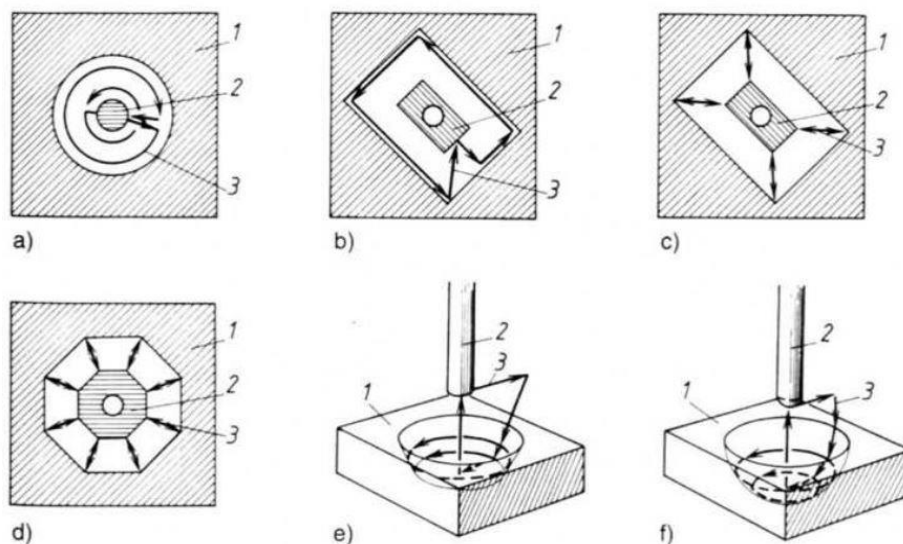
## Elektrojiskrové obrábění

Pod elektrojiskrové obrábění spadají dva základní typy elektroerozivního obrábění a to je elektrojiskrové hloubení a elektrojiskrové řezání [1-6].

Elektrojiskrové hloubení je základní typ elektroerozivních metod obrábění. Tato metoda nachází velké využití zejména při tvorbě vnitřních ploch při výrobě tvářecích zápustek, forem pro lití, nástrojů pro lisování plastů, střížných nástrojů, obrábění slinutých karbidů apod. Standartní postup obrábění spočívá v tom, že nástroj má tvar negativu obráběné plochy. Moderní obráběcí stroje dokáží složitější tvary hloubit do obrobku elektrodou jednoduchého tvaru (obr. 2), která díky CNC řízení vykonává pohyb po dané dráze, nebo u staršího typu strojů bývá využíváno tzv. vychylovačů elektrod, které slouží k pohybu nástroje po dané dráze [1-6].



Obr. 1 Princip elektrojiskrového hloubení [7]



1 – anoda, 2 – obrobek, 3 – pohyb elektrody

a) kruhové, b), c) obdélníkové, d) osmihranné, e) kuželové, f) kulové

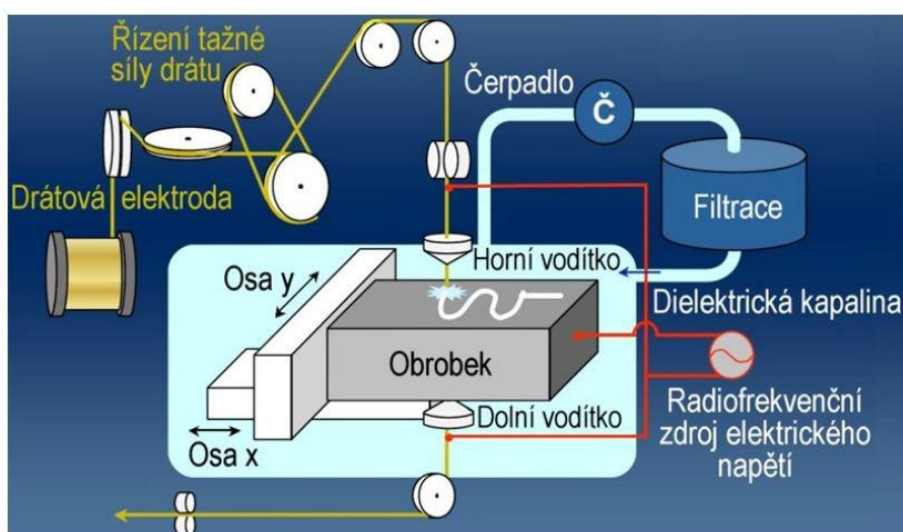
Obr. 2 Výroba různých tvarů jednoduchou elektrodou s řízeným pohybem [5]

Vhodné materiály pro nástrojovou elektrodu (anodu) musí mít specifické vlastnosti, například vysokou elektrickou vodivost, dobrou obrobitelnost, vysoký bod tavení a dostatečnou pevnost, aby nedocházelo k deformaci nástroje při vlastním elektroerozivním obrábění [1-6].

**Tab 1.1 Materiály pro nástrojové elektrody [2,6].**

Materiál	Charakteristika
<b>Grafit</b>	nejčastější použití, dobrá obrobitelnost, nízké opotřebení, nevýhoda – znečišťování hloubicího stroje
<b>Měď</b>	dobrá el. vodivost, nízké opotřebení, vhodná pro obrábění karbidu wolframu, horší vlastnosti při elektroerozivní obrábění než grafit a mosaz
<b>Měď – wolfram a stříbro - wolfram</b>	pro elektrody na hluboké drážky, drahé materiály, vyrábí se slinováním wolframu s mědi nebo stříbrem, po slinování neobrobitelné - křehké
<b>Měď – grafit</b>	až dvakrát dražší než grafit, vhodný k obrábění karbidu wolframu
<b>Mosaz</b>	snadno obrobitelná, levná, nevýhoda – vysoké opotřebení při elektroerozi
<b>Wolfram</b>	pro malé otvory do průměru 0,2 mm

Elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou se vyznačuje minimální šířkou řezu a nachází velké uplatnění při výrobě střížných a lisovacích nástrojů a také při dělení velmi tvrdých a pevných materiálů (např. slinuté karbidy, elektricky vodivé keramické materiály, další karbidy a nitridy, slitiny titanu, superslitiny apod.) Nástrojová elektroda je tenký drát (průměr od cca 0,03 mm), který se odvíjí z cívky a přes soustavu kladek a napínacích mechanismů prochází místem řezu (obr. 3). Mezera mezi obrobkem a drátem je zalévána dielektrickou kapalinou. Materiál drátu bývá nejčastěji měď a její slitiny, zejména mosaz a pro velmi jemné řezy se používá molybden. V současnosti se také využívají povlakované dráty s jádrem ze slitiny mědi a povlakem s vysokým obsahem zinku. Pohyb stolu obráběcího stroje pro drátové řezání je řízen CNC a dovoluje i naklápění až do 30°, což umožňuje vyrábět složitější tvary, kuželovité součásti apod. [1,2,3,5,6].

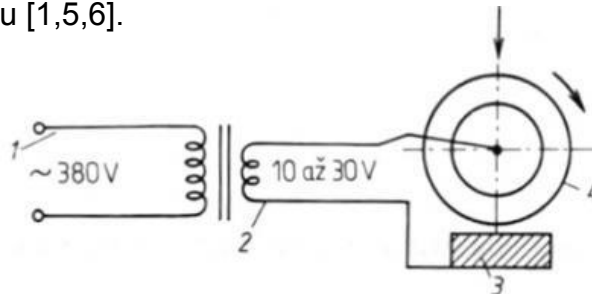


Obr. 3 Elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou [3]



## Elektrokontaktní obrábění

Tato metoda obrábění je založena na odporovém odtavování materiálu obrobku v místě styku s nástrojem. Používá se střídavý proud o nízkém napětí (kolem 25 V). Když se přiblíží nástroj k obrobku, vznikne krátkodobý oblouk a v místech kontaktu roste přechodový odpor, a tím se uvolňuje velké množství tepla a dochází k natavení materiálu obrobku. Aby nedocházelo v místech kontaktu místo k obrábění ke svařování, nástroj se pohybuje – většinou vykonává rotační pohyb a díky tomu vznikají oblouky na jiných místech, jde tedy o mechanicky buzené elektrické oblouky (obr. 4). Nástroj je ochlazován proudem kapaliny, nebo stlačeného vzduchu, což má za následek také odstraňování ztuhlých částic z místa řezu. Výhodou elektrokontaktního obrábění je jednoduchost výrobních zařízení s vysokou produktivitou, nevýhodou je nízká tvarová a rozměrová přesnost obrobené plochy a nízká jakost povrchu [1,5,6].

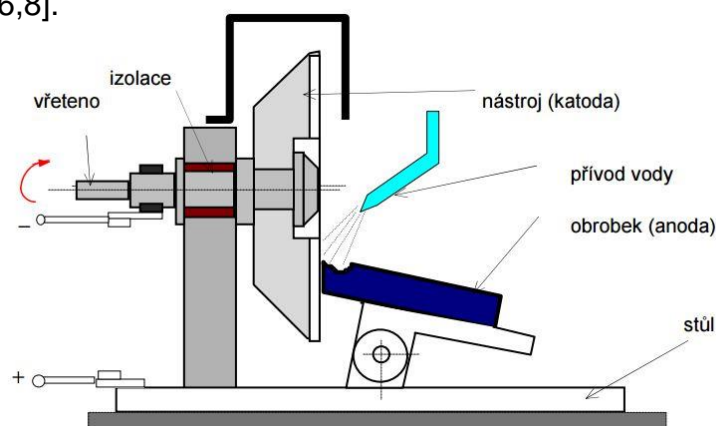


1 – napájecí zdroj, 2 – transformátor, 3 – obrobek, 4 – nástrojová elektroda

Obr. 4 Schéma principu stroje pro elektrokontaktní obrábění [5]

## Anodomechanické obrábění

Anodomechanické obrábění je z hlediska odebrání materiálu na rozhraní mezi elektroerozivním a chemickým obráběním, protože k úběru materiálu dochází kombinací účinků elektrických výbojů, mechanického tření a elektrochemického rozpouštění. Mezi nástroj a obrobek je přiváděn proud elektrolytu (nejčastěji vodní sklo) a ten na povrchu obrobku vytváří pasivační vrstvičku, kterou v místě styku stírá rotující nástroj (obr. 5). Díky tomu dochází k jiskrovým výbojům a ty rozrušují obráběný materiál. Tato metoda se používá především k broušení nástrojů ze slinutých karbidů, rozřezávání tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů a pro řezání tenkostěnných profilů, které se při obrábění konvenčními metodami mohou deformovat [2,4,6,8].

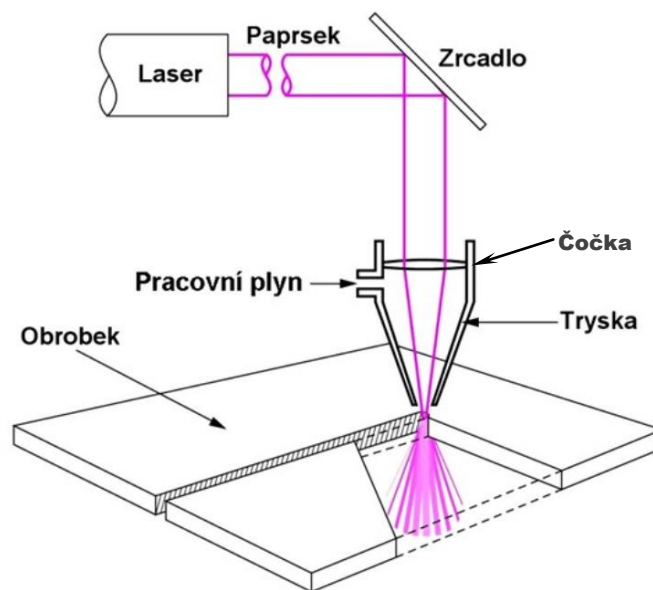


Obr. 5 Anodomechanické obrábění

Na výrobu dutin vstřikovacích forem se z uvedených třech druhů elektroerozivního obrábění nejvíce využívá elektrojiskrového hloubení nebo elektrojiskrového řezání drátovou elektrodou.

### 1.3.2 Obrábění paprskem laseru

Laserovým obráběním rozumíme odebírání materiálu díky účinku úzkého paprsku silného monochromatického světla, soustředěného pomocí optických prvků do malé plošky (obr. 6). Díky působení laserového paprsku dochází v místě dopadu k ohřevu materiálu na velmi vysokou teplotu (až  $10^4$  °C) a k jeho roztavení. Laserové obrábění je vhodné pro různé druhy materiálů od ocelí, přes plasty, dřevo i těžkoobrobitelné materiály [1,2,3,6].



Obr. 6 Schéma obrábění laserem [3]

Přednosti laseru jsou hojně využívány v různých odvětvích. Použití laseru v průmyslové oblasti v technologickém zpracování materiálů má tyto výhody [1]:

- několikanásobné využití laseru, jeden zdroj může být optickými prvky veden na několik pracovišť,
- laser lze využívat pro různé technologické aplikace bez nutnosti výměny „nástroje“,
- díky zaostření paprsku dokáže laser řezat s velmi úzkou mezerou řezu,
- možnost využití automatizace a CNC systémů,
- laserem lze obrábět různé druhy materiálů i těžkoobrobitelné,
- provoz laseru je čistý,
- při obrábění je tepelně ovlivněná oblast velmi malá,
- laserové obrábění je bezsilové.



Lasery se dělí podle laserového media (aktivní látky, tj. materiál, který generuje záření), vlnové délky, konstrukce zařízení a použití. Druhy laserů uvádí následující tabulka [6].

Tab. 1.2 Vybrané druhy laserů [6,9].

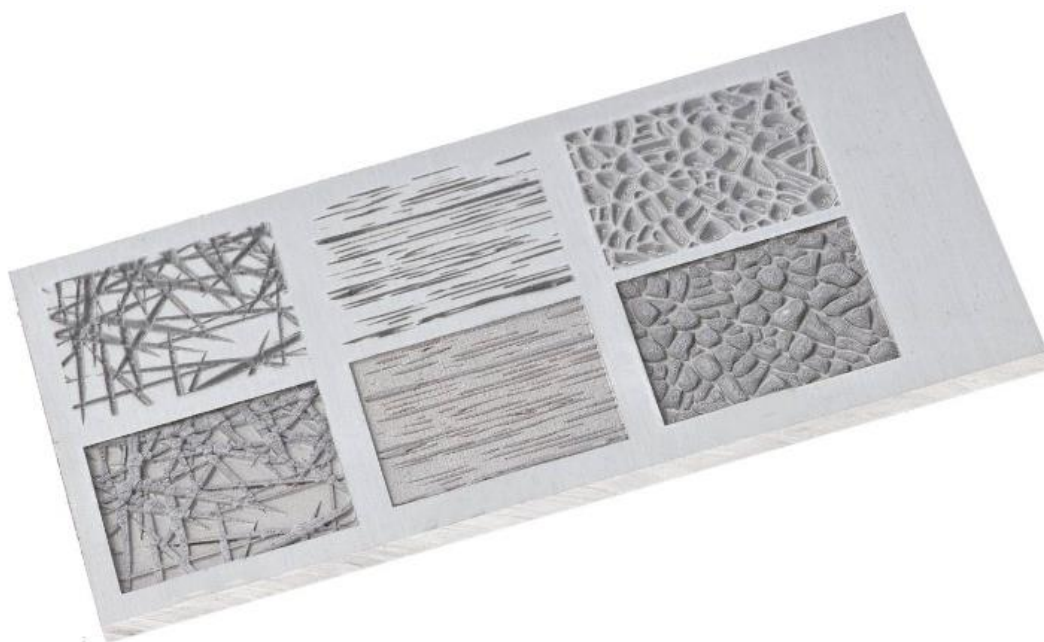
druh laseru	aktivní látka		vlnová délka	typ paprsku	výkon laseru	aplikace
			[ $\mu\text{m}$ ]			
PEVNÝ	rubín	$\text{Cr}^{3+}$	0,6943	pulzní	5 W	holografie
	Nd-YAG	$\text{Nd}^{3+}$	1,064	kontinuální pulzní	100 až 1200 W	strojní průmysl
	Nd-sklo	$\text{Nd}^{3+}$	1,064	pulzní	2 mW	
	alexandrit	-	0,7 až 0,818	pulzní	10 W	
POLOVODIČOVÝ	GaAs	-	0,8 až 0,9	pulzní	2 až 10 mW	informační technologie
PLYNOVÝ	$\text{CO}_2(\text{N}_2+\text{He})$	$\text{CO}_2$	10,6	kontinuální pulzní	500 až 15000 W	strojní průmysl
	He-Ne	Ne	0,6328; 1,15	kontinuální	20 mW	metrologie
	Ar	$\text{Ar}^+$	0,4764; 0,488; 0,5145	kontinuální pulzní	1 až 5000 W	laserová chirurgie
	<b>Excimer</b>					
	<i>ArCl</i>	-	0,170	pulzní	20 až 250 W	strojní průmysl, laserová chirurgie
	<i>XeCl</i>	-	0,308	pulzní		
	<i>XeF</i>	-	0,351	pulzní		
	<i>KrF</i>	-	0,248	pulzní		

Laser nachází využití v těchto technologických aplikacích [1,6,10]:

- obrábění a řezání materiálu,
- vrtání otvorů,
- značení a gravírování,
- svařování a navařování,
- nanášení povlaků, tepelné zpracování.

## Značení a gravírování

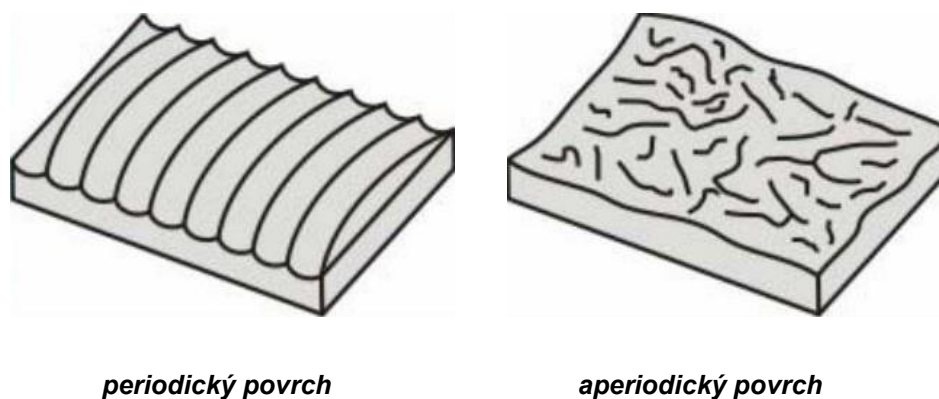
Lasery se běžně používají k označování či popisu různých druhů materiálů. Moderní laserové systémy s podporou CAD systémů dokáží vytvořit velmi detailní vzory a struktury. Tato metoda je hojně využívána, protože se jedná o velmi rychlou a efektivní metodu popisu materiálu. Další výhodou je, že tento způsob popisu je nesmazatelný a nízkonákladový. Speciálním způsobem gravírování je tvorba různých struktur a textur na povrchu materiálu (obr. 7), což se hojně využívá například při výrobě forem na vstřikování plastů, kdy dochází k výrobě speciálního dezénu. Takovéto dezény (textury) jsou vidět na každém plastovém výlisku [10,11].



Obr. 7 Příklad textury od firmy Lintech [11]

## 1.4 Struktura povrchu nekonvenčních metod obrábění

Při každém obrábění vznikají na všech typech povrchu stopy po nástroji. Stopy po nástroji jsou na povrchu uspořádány prostorově a jejich vyhodnocování je technologicky náročné. Z tohoto důvodu se využívá zjednodušených metod měření drsnosti povrchu v řezu, který prochází skrze tyto nerovnosti. U konvenčních metod obrábění jako je soustružení a frézování vzniká při obrábění periodický povrch. U broušení, kování nebo u nekonvenčních metod obrábění vzniká tzv. aperiodický povrch (obr. 8). Pro měření drsnosti povrchu se používají dvě základní metody. Pro měření v rovině řezu je to dotyková metoda a pro měření plošných nerovností je to metoda optická [12,13].

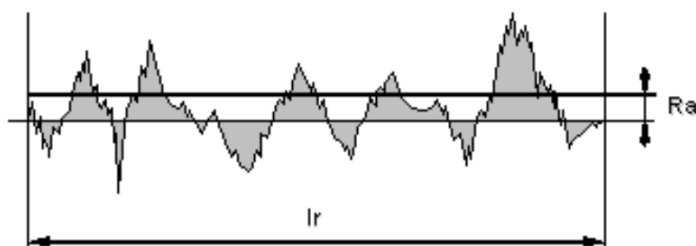


Obr. 8 Periodický a aperiodický povrch [12]

Drsnost povrchu je tedy definována souhrnem nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které vznikají při výrobě nebo vlivem výroby. Do drsnosti se nezapočítávají vady povrchu materiálu, jako jsou náhodné nepravidelné nerovnosti, které vznikají vadami materiálu, poškozením apod. [13-15].

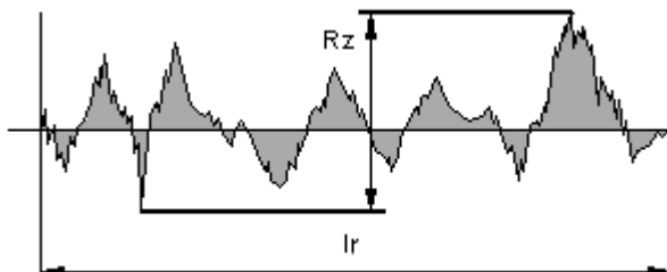
Ke kvantifikaci drsnosti povrchu se využívají statistické veličiny, z nichž nejčastěji používané jsou [13-15]:

- střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$ , tj. střední aritmetická hodnota absolutních hodnot úchylek  $y_i$  profilu v celé základní délce  $l_r$  (obr. 9).



Obr. 9 Průměrná aritmetická úchylka profilu  $R_a$  [13]

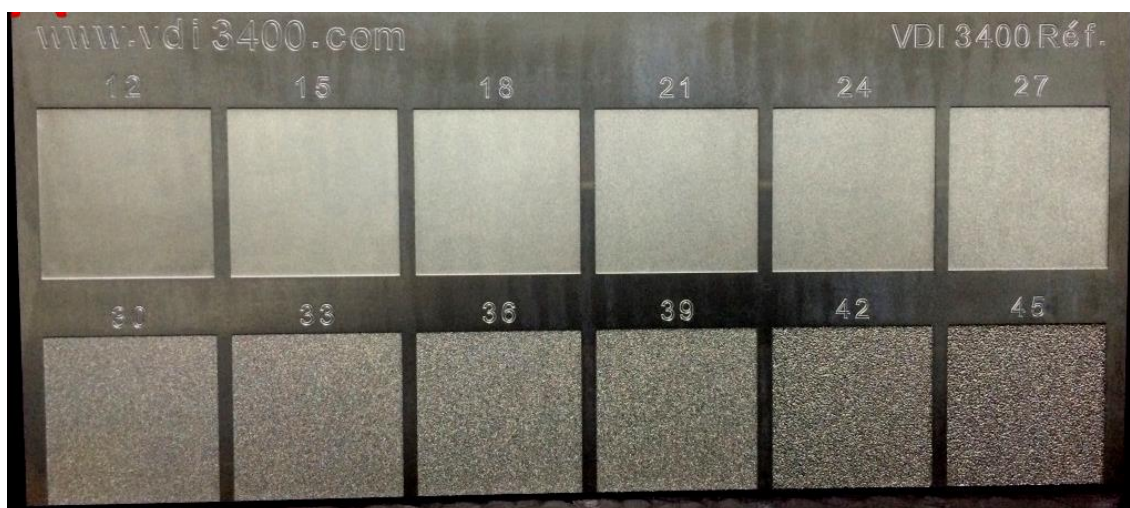
- největší výška profilu  $R_z$ , tj. součet nejnižší prohlubně a nejvyššího výstupku profilu v základní délce  $l_r$  (obr. 10).

Obr. 10 Největší výška profilu  $R_z$  [13]

U elektroerozivního obrábění se používá speciální stupnice drsnosti obrobeného povrchu, která vyjádřena bezrozměrnými hodnotami VDI. Vztahy mezi stupnicí VDI a  $R_a$  uvádí tabulka 1.3. Na obrázku 11 je pak kovová destička se stupnicí VDI, která slouží k vizuálnímu porovnání povrchů obrobených elektroerozivně.

Tab. 1.3 Stupnice  $R_a$  – VDI.

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	0,4	0,6	0,8	1,1	1,6	2,3	3,1	4,5	6,3	9,0	12,5	18
VDI (-)	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45



Obr. 11 Porovnávací destička se stupnicí VDI od firmy VDI3400 [16]

## 2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU FOREM, VÝBĚR PROBLÉMOVÉ FORMY

### 2.1 Specifikace výlisku

Výlisky z plastů jsou nedílnou součástí našeho každodenního života. Možnost snadno tvarovat různé druhy plastů do rozmanitých tvarů pomocí vstřikovacích forem vede k tomu, že nás obklopují miliony plastových dílů různých tvarů, barev a použití. Tato práce pojednává o konkrétních typech plastových dílů, a tím jsou optiky, které slouží k usměrnění světelných paprsků LED diod (obr. 12). Tyto optiky jsou vyráběny například z čirého polykarbonátu a mají různé tvary a povrchy, ze kterých vystupuje světlo, a díky tomu světelné paprsky nasměrují do požadovaného směru. Proto jsou vhodné pro širokou škálu aplikací.



Obr. 12 Optiky společnosti Carclo Optics [17]

### 2.2 Rozbor současného stavu forem

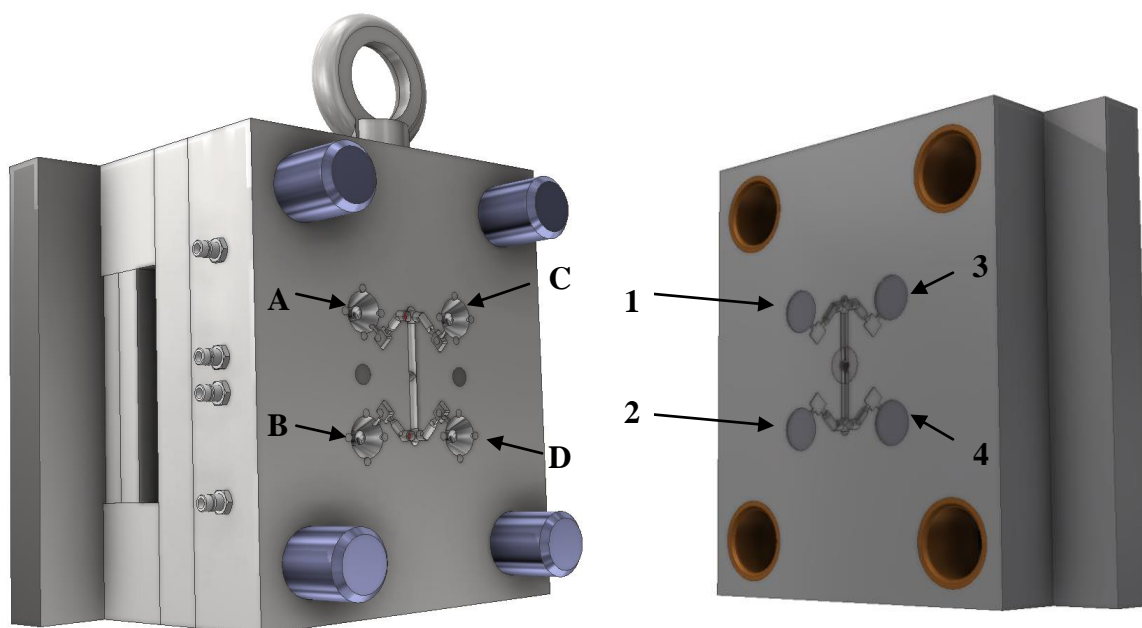
Formy, ve kterých se vyrábí tyto optiky, jsou značně univerzální, z jedné formy lze tedy vyrábět různé druhy optik. Tělo formy zůstává stejné a výměnou několika tvárníků je dosaženo změny vyráběných optik dle požadované specifikace. Výhoda těchto forem může být například ve snížení nákladů na výrobu. Mezi nevýhody patří poničení tvárníků během výměny a skladování těch, které se zrovna nepoužívají.

Největší problém nastává při poničení tvárníků se speciálním povrchem (obr. 13), který je na největším „průměru“ dílu. Tento matný povrch (anglicky frosted surface) má za úkol ztmavit (zmatnit) světlo vystupující z optiky a zároveň je to i pohledová část dílu. Povrch je vytvořen díky tvárníku, který má na sobě vytvořenou matnou (frosted) texturu (obr. 13). Pro optiky jsou používány dva typy těchto textur, které se od sebe liší a to **frosted 5°** a **frosted 20°**. Tvárníky mají tvar kruhových (případně čtvercových) vložek do formy a jsou upevněny v nepohyblivé části formy (obr. 14).



Obr. 13 Detail frosted povrchu tvárníku pořízený digitálním mikroskopem Dino-Lite AM2111

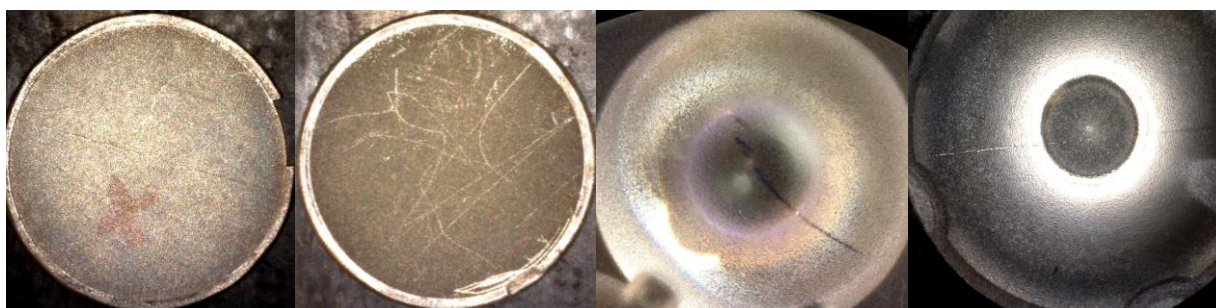




**1-4 výměnné vložky s frosted povrchem**  
**A-D výměnné tvárníky (piny) tvořící čočku optiku**

Obr. 14 Model formy pro optiku typu 26,5 mm

Poškození frosted povrchu na vložce formy (obr. 15) se při vylisování obtiskne na optiku a dojde k znehodnocení dílu. Mnohé poškození tvárníků se projeví až na hotovém výlisku, a tím dochází k zvyšování nákladů při výrobě dílů, protože výlisky, které nesplňují specifikace zákazníka, jsou vyřazeny z prodeje.



Obr. 15 Poškrábané vložky s frosted povrchem a škrábance na výliscích

Přehled poškozených vložek uvádí následující tabulka.

**Tab. 2.1 Přehled poškozených vložek frosted povrchů.**

ČÍSLO FORMY	TYP OPTIKY	TYP FROSTED POVRCHU	CELKOVÝ POČET VLOŽEK	Z TOHO POŠKOZENÝCH
CT870101	20 mm	frosted 5°	8	2
		frosted 20°	8	2
CT870102	20 mm	frosted 5°	8	2
		frosted 20°	8	2
CT870103	10 mm Square	frosted 20°	8	1
CT870104	26,5 mm	frosted 5°	4	0
		frosted 20°	4	0
CT870105	10 mm Quad	frosted 5°	4	0
		frosted 20°	4	0
CT870106	26,5 mm	frosted 5°	4	0
		frosted 20°	4	0
CT870109	26,5 mm	frosted 5°	4	1
CT870110	10 mm IP66	frosted 5°	4	0
		frosted 20°	4	0
CT870119	20 mm	frosted 5°	16	4
		frosted 20°	16	4
CT870120	30 mm	frosted 5°	8	1
		frosted 20°	8	4
CT870124	10 mm	frosted 5°	4	1
		frosted 20°	4	1

Z tabulky 2.1 vyplývá, že zhruba pětina vložek je poničená a chybí za ně náhrada, proto je nutné poničené vložky nahradit tak, aby každá z forem mohla vyrábět na plnou kapacitu. V současnosti se z mnohých forem nevyrábí na plnou kapacitu a je například celá polovina formy „zaslepena“. U vyrobených výlisků s drobnějšími vadami je nutné požádat o výjimku zákazníka, jestli je možné určité vady akceptovat a poslat díly do prodeje.

## 2.3 Výběr problémové formy

Nejproblematictější je forma CT870120 s vložkami frosted 20°, kde je celá polovina vložek zničená. Není však nutno zabývat se přímo touto konkrétní formou, protože frosted povrchy jsou stejné i pro všechny ostatní formy. Proto je možné vybrat jakoukoli formu. Je ale nutné vybrat oba dva typy povrchů.

Pro další zkoumání byly vybrány vložky:

- frosted 5° z formy CT870119,
- frosted 20° z formy CT870124.



### 3 ROZBOR ORIGINÁLU TVÁRNÍKU Z HLEDISKA POUŽITÉHO MATERIÁLU A INTEGRITY POVRCHU

#### 3.1 Určování materiálu vložek

Vybrané vložky byly důkladně očištěny technickým lihem od veškerých nečistot a upevněny na rastrovací elektronový mikroskop (SEM) MIRA3 od firmy Tescan (obr. 16). Tento mikroskop je vybavený dvěma detektory SE a BSE a jako příslušenství má i EDX sondu, díky které se dá určovat pomocí spektroskopie chemické složení a textura povrchu [18].

*Parametry SEM [18]:*

- maximální rozlišení: 1 nm od 30 kV,
- rozsah zvětšení:  $2\times - 1\,000\,000\times$ .

*Příslušenství:*

- EDX – Energetická disperzní rentgenová spektroskopie,
- WDS – Vlnová disperzní rentgenová spektroskopie,
- EBIC – Elektronový paprsek indukovaný proudem.

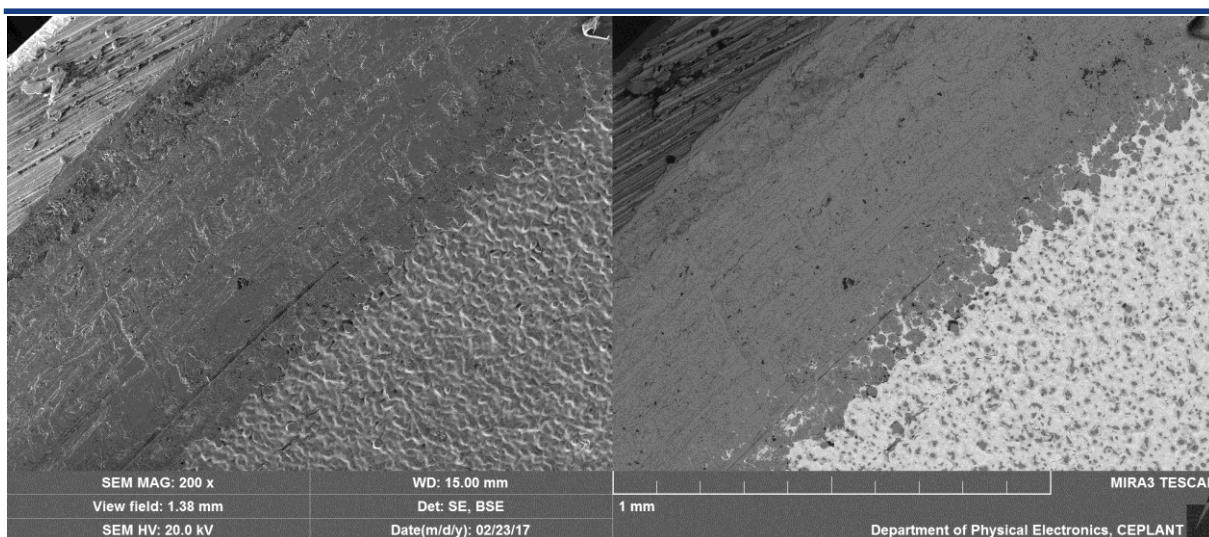


Obr. 16 Elektronový mikroskop Tescan společnosti Ceplant [18]

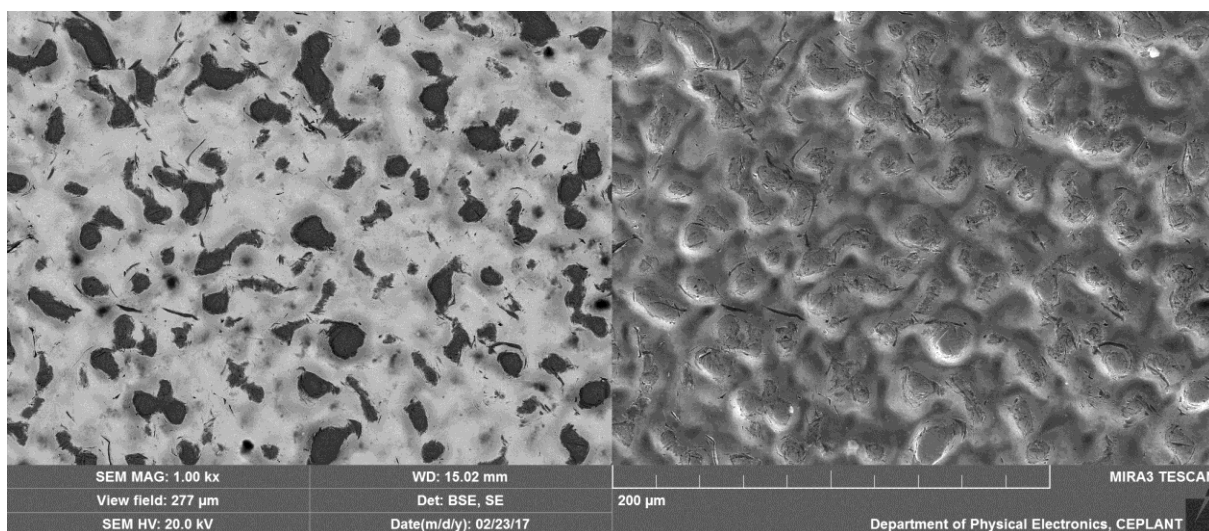
Měření na elektronovém mikroskopu probíhalo ve spolupráci se společností Ceplant spadající pod Přírodovědeckou fakultou Masarykovy univerzity v Brně.

##### 3.1.1 Vložka frosted 20°

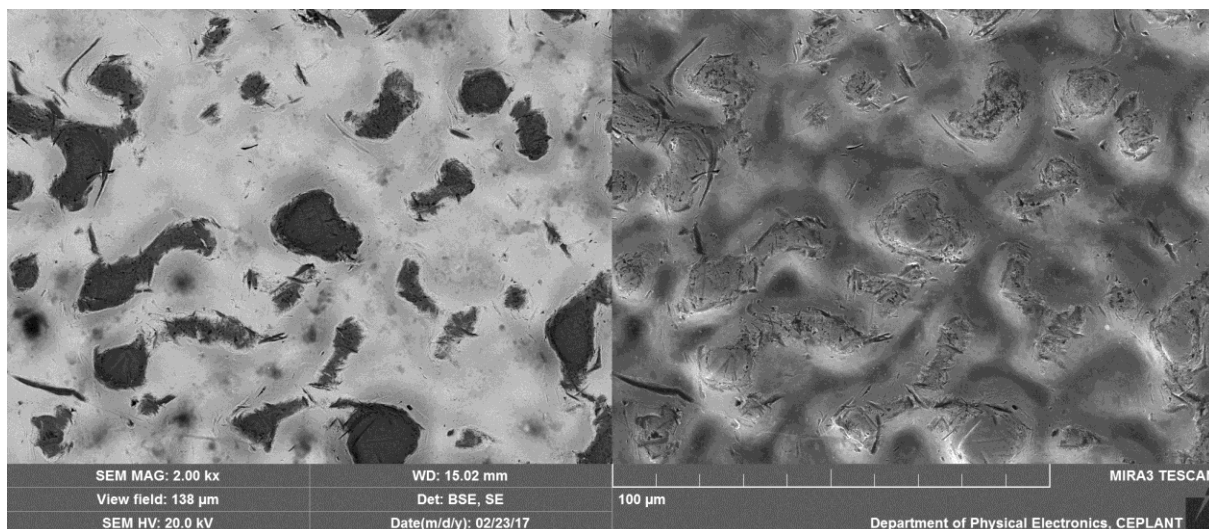
Jako první byla zkoumána vložka s 20° povrchem. Obrázek 17 znázorňuje detail okraje vložky zvětšený 200 $\times$ . Jsou zde dobře patrné tři oblasti. První oblastí je sražená hrana vložky, v druhé lze vidět zdeformovanou texturu vložky z důvodu otlačení, které vzniklo kvůli upevnění vložky do pevné části formy, a třetí oblastí je samotná textura. Na dalších obrázcích s postupným zvětšováním přiblížení lze vidět detaily textury povrchu s nepravidelnými krátery (obr. 18,19).



Obr. 17 Snímek ze SEM okraje vložky frosted 20° při zvětšení 200×

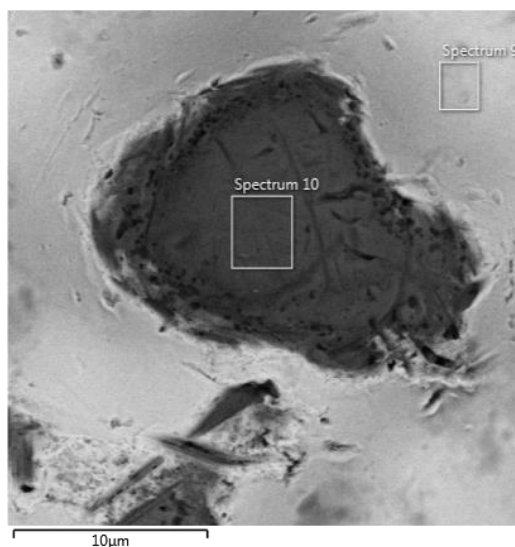


Obr. 18 Snímek ze SEM povrchu vložky frosted 20° při zvětšení 1000×

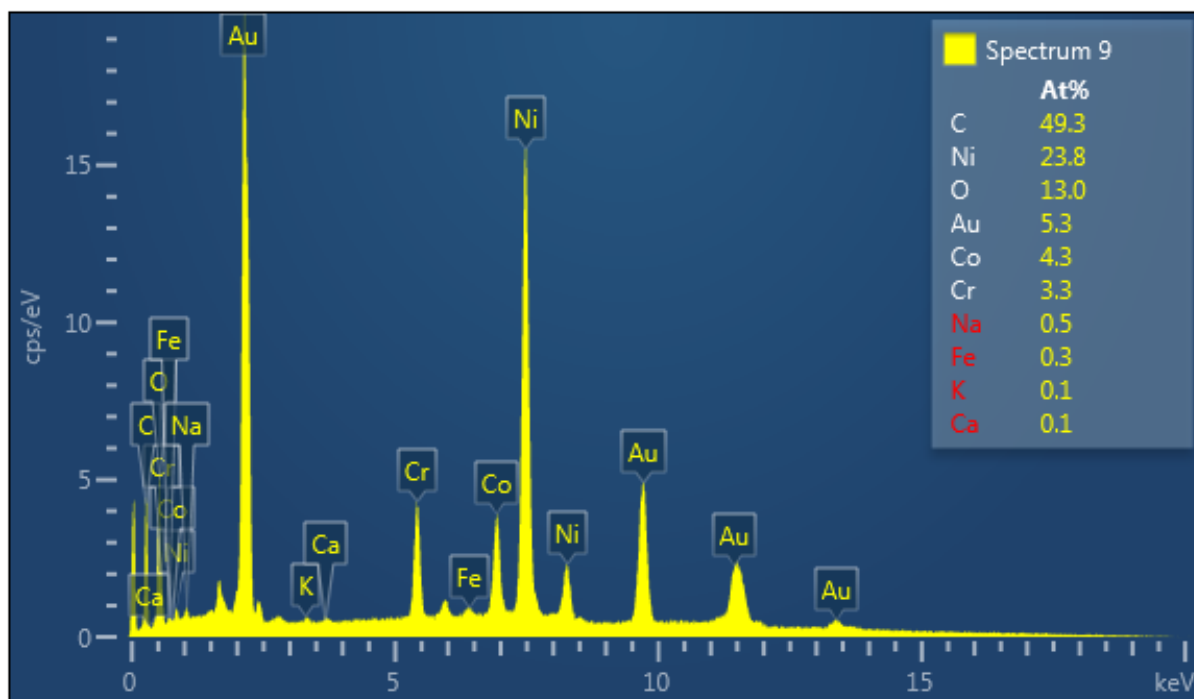


Obr. 19 Snímek ze SEM povrchu vložky frosted 20° při zvětšení 2000×

Na předchozích snímcích je vidět, že textura frosted povrchu je značně opotřebovaná neustálým používáním vložky ve formě. Při zvětšení 2000× byla vybrána malá oblast jednoho kráteru (obr. 20) a v této oblasti bylo provedeno vyhodnocení chemického složení sondou EDX. Vyhodnocení chemického složení na povrchu mimo kráter vykresluje spektrum 9 (obr. 21). Prvky zobrazené červeně jsou ty, které se mohou vyskytovat ve stopovém množství. Spektrum 10 (obr. 22) vykresluje chemické složení uvnitř kráteru, kde ještě nedošlo k opotřebení povrchové vrstvy vložky. Z vytvořených spekter lze vyvodit, že vyrobená textura na vložce byla povlakována slitinou s obsahem zlata, chromu, uhlíku a dalších prvků, zatímco matrice je složena převážně z niklu, uhlíku a kobaltu.

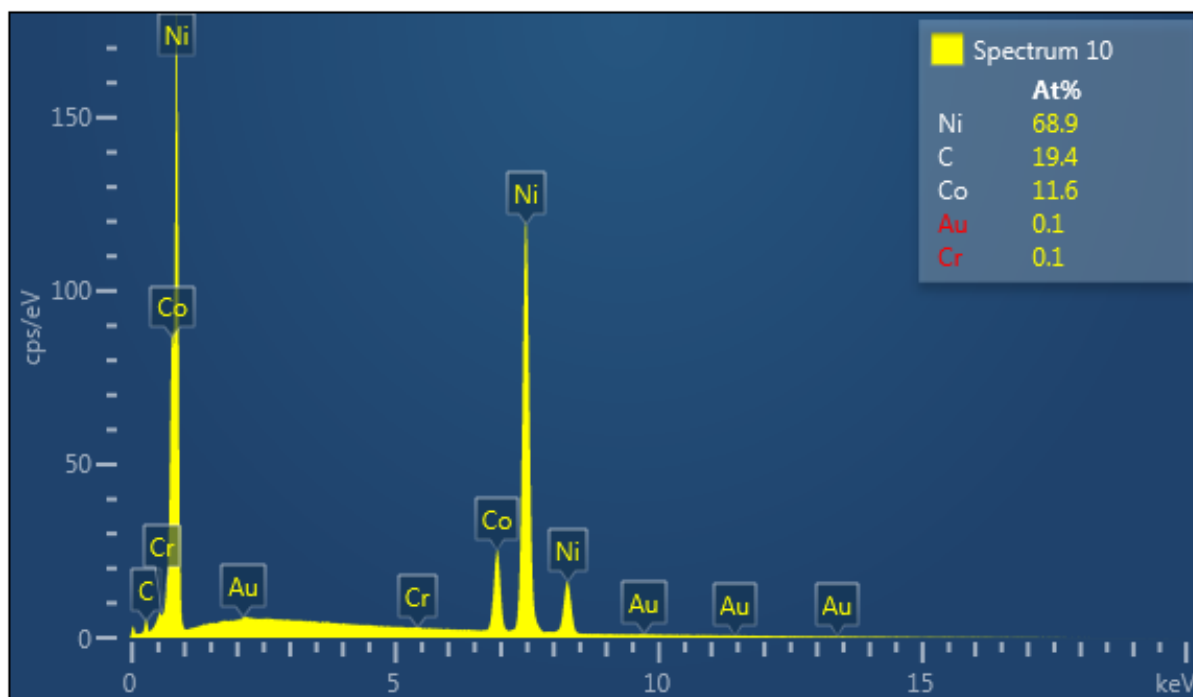


Obr. 20 Snímek vybraného kráteru pro analýzu chemického složení



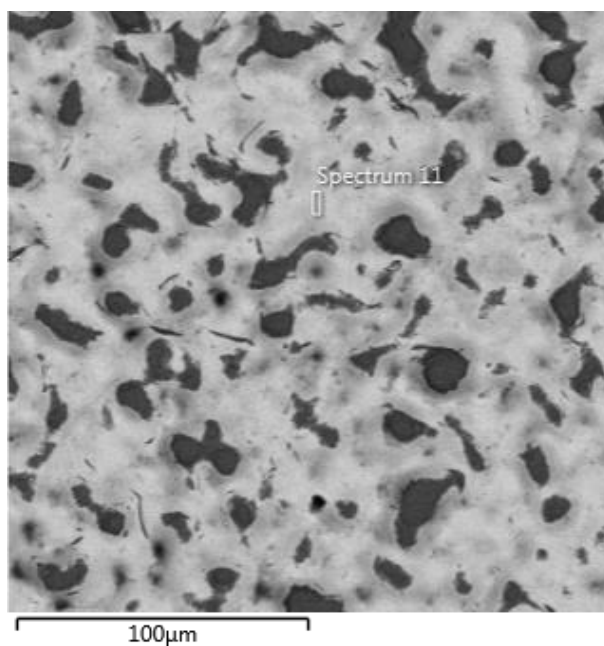
Obr. 21 Spektrum prvků v oblasti 9 vyobrazené softwarem AZtec Energy



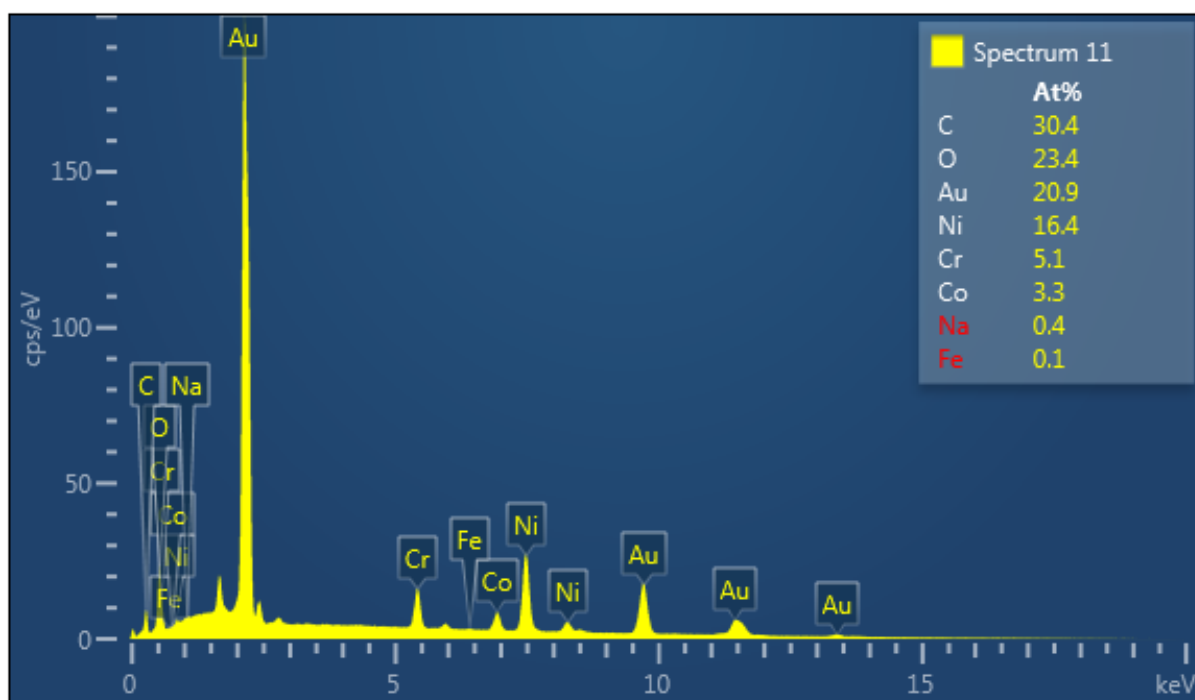


Obr. 22 Spektrum prvků v oblasti 10 vyobrazené softwarem AZtec Energy

Chemické složení povlaku bylo ověřeno na dalším místě vložky (obr. 23), kde nebylo tak zřetelné opotřebení a poškození povlaku, a bylo také vyhodnoceno pomocí EDX sondy softwarem AZtec Energy (obr. 24).



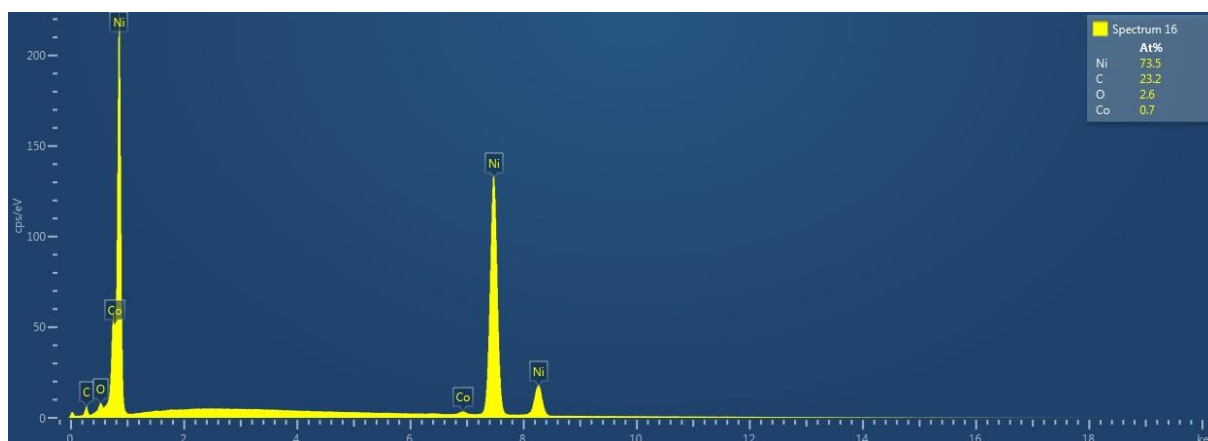
Obr. 23 Snímek oblasti, kde povlak na vložce nebyl tolik poškozen



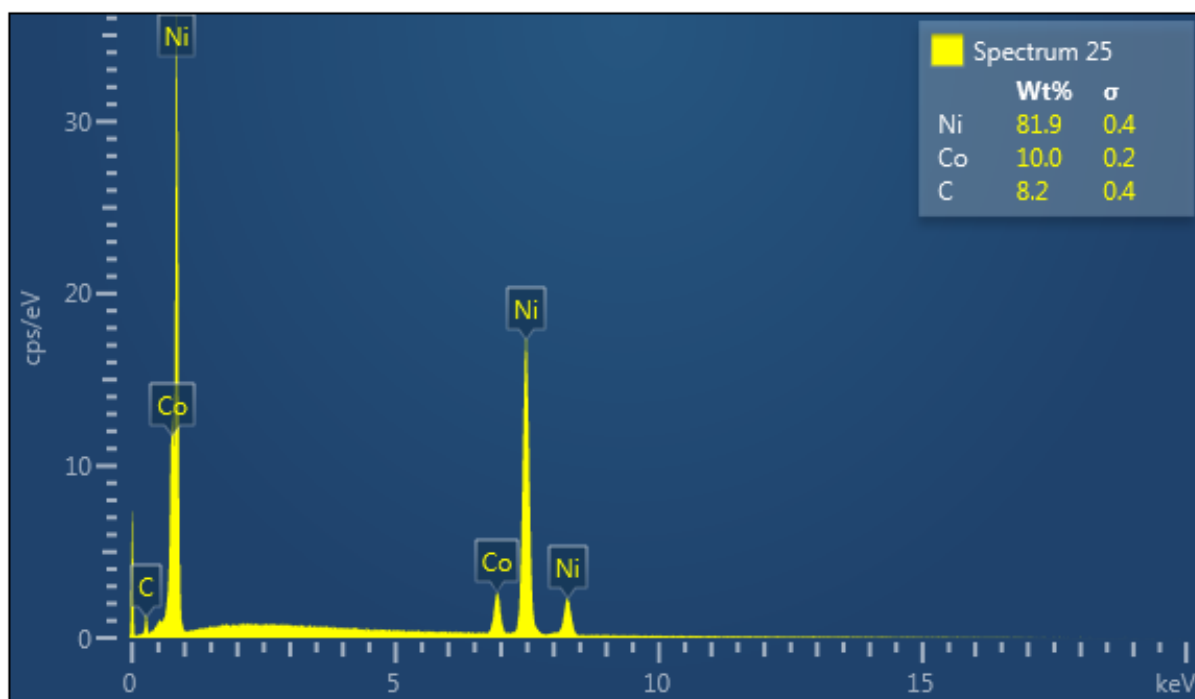
Obr. 24 Spektrum prvků povlaku v místě, kde není povlak poškozen

Vložka byla poté v elektronovém mikroskopu otočena, aby bylo možné se mikroskopem podívat ze spodní strany, kde není textura, a zjistit a ověřit chemické složení základního materiálu i na místě, kde není vložka povlakovaná (obr. 25).

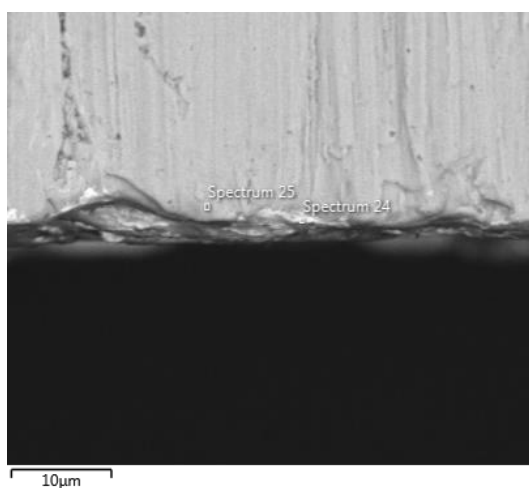
Chemické složení základního materiálu uvnitř vložky (obr. 26) bylo ověřeno tak, že část vložky byla šetrně odbroušena, aby se elektronovým mikroskopem dalo podívat „dovnitř“ (obr. 27). Chemické složení v různých místech je uvedeno v tabulce 3.1. Podle místa, které bylo analyzováno, se může chemické složení materiálu mírně lišit.



Obr. 25 Spektrum prvků na spodní straně vložky bez textury a povlaku



Obr. 26 Spektrum prvků uvnitř vložky, v místě odbroušení



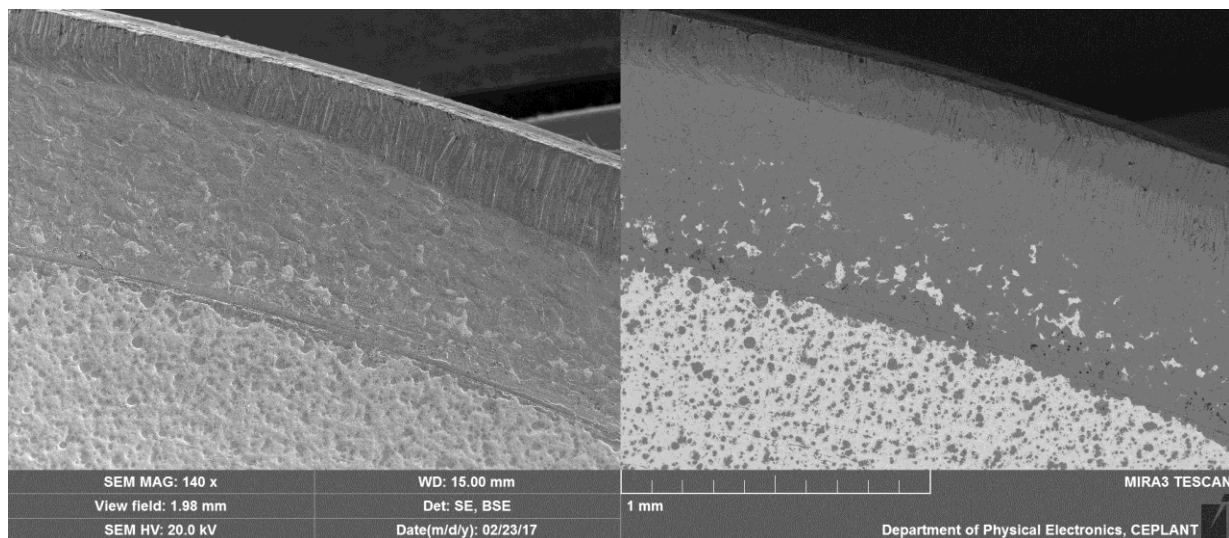
Obr. 27 Snímek odbroušeného místa na vložce

Tab. 3.1 Přehled chemického složení v různých místech vložky frosted 20°.

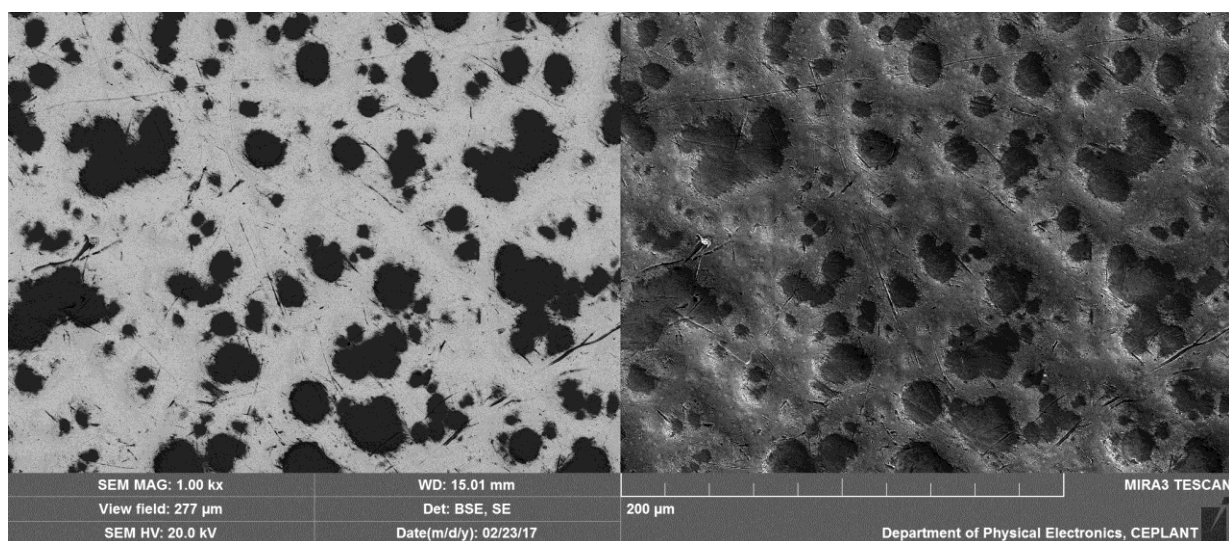
	Ni [hm%]	C [hm%]	O [hm%]	Co [hm%]	Au [hm%]	Cr [hm%]
Chem. složení povlaku 1	23,8	49,3	13,0	4,3	5,3	3,3
Chem. složení povlaku 2	16,4	30,4	23,4	3,3	20,9	5,1
Chem. složení spodní strana	73,5	23,2	2,6	0,7	-	-
Chem. složení uvnitř	81,9	8,2	-	10,0	-	-

### 3.1.2 Vložka frosted 5°

Podobný postup byl použit i u vložky frosted 5°. Na obrázku 28 lze vidět detail okraje vložky opět s třemi oblastmi (sražená hrana, otláčená textura, textura frosted 5°). Na dalších snímcích při větším přiblížení lze vidět, že textura povrchu je mnohem jemnější a krátery nejsou tak hluboké jako u vložky frosted 20° (obr. 29-32).



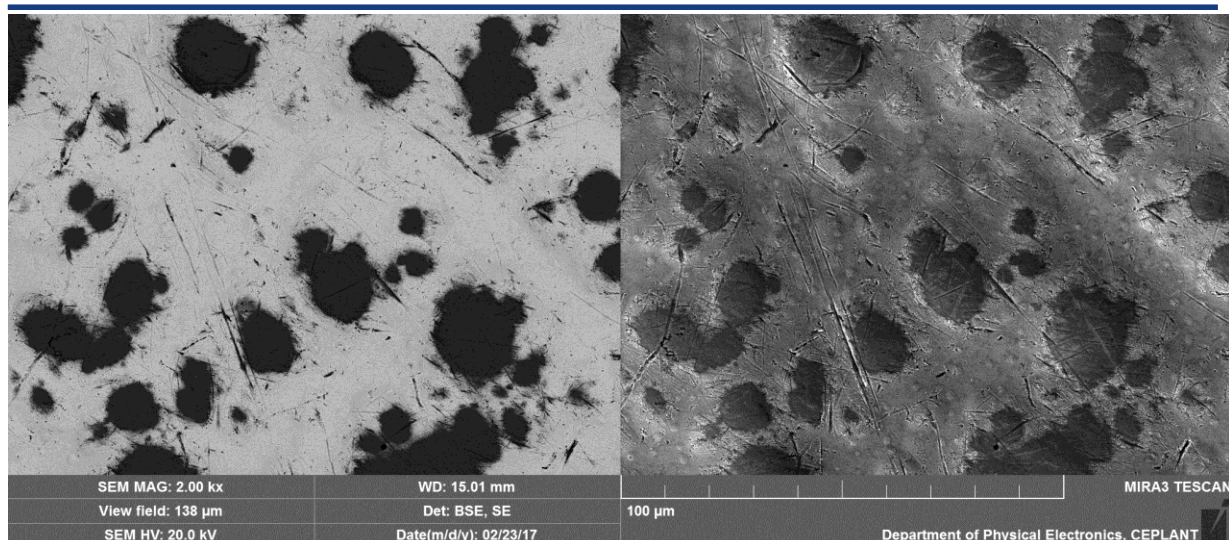
Obr. 28 Snímek ze SEM okraje vložky frosted 5° při zvětšení 140×



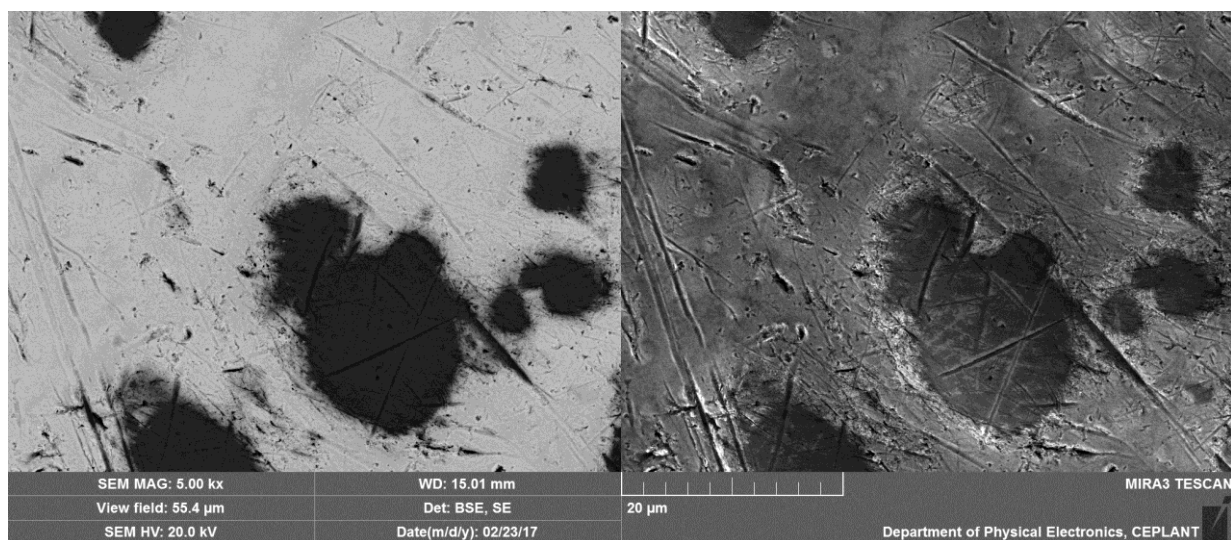
Obr. 29 Snímek ze SEM povrchu vložky frosted 5° při zvětšení 1000×

Na snímcích s větším přiblížením je taky dobře patrné poškození povlakové vrstvy textury. Jsou zde dobře viditelné různé rýhy, vrypy a škrábance (obr. 30-32) způsobené běžnou výrobou i špatným skladováním nepoužívaných vložek.

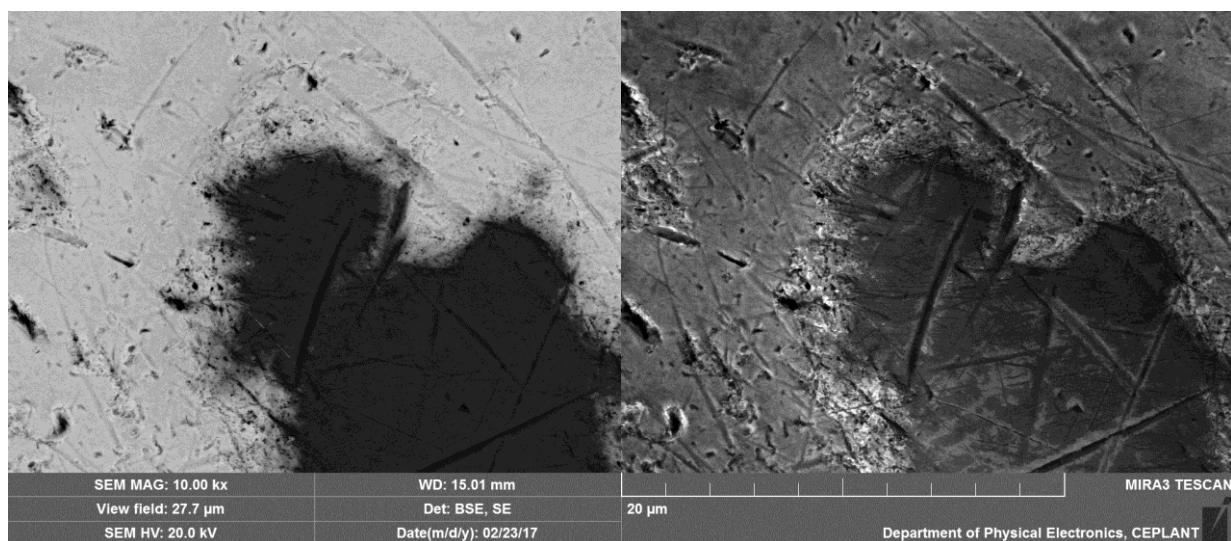




Obr. 30 Snímek ze SEM povrchu vložky frosted 5° při zvětšení 2000x



Obr. 31 Snímek ze SEM povrchu vložky frosted 5° při zvětšení 5000x

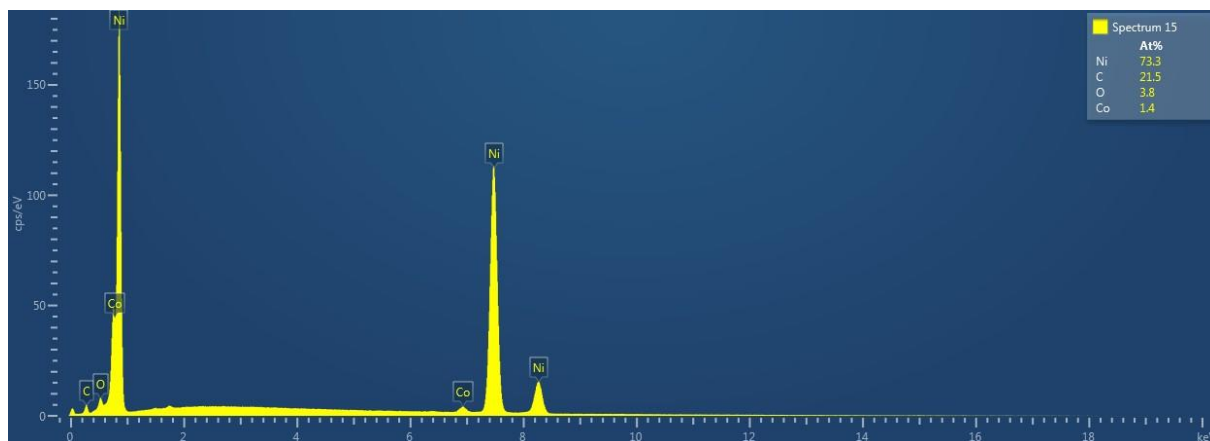


Obr. 32 Snímek ze SEM povrchu povrchu frosted 5° při zvětšení 10 000x

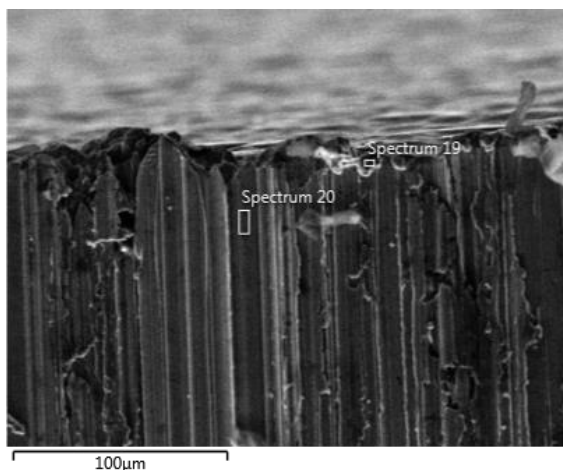


Použití sondy EDX pro zjištění chemického složení na vložce frosted 5° bylo více zaměřeno na základový materiál než na chemické složení povlaku. Chemické složení bylo zjištěno na třech okrajových oblastech vložky (příloha 1), ale zejména pak na spodní straně (obr. 33) a potom „uvnitř“ vložky po šetrném odbroušení (obr. 34, 35).

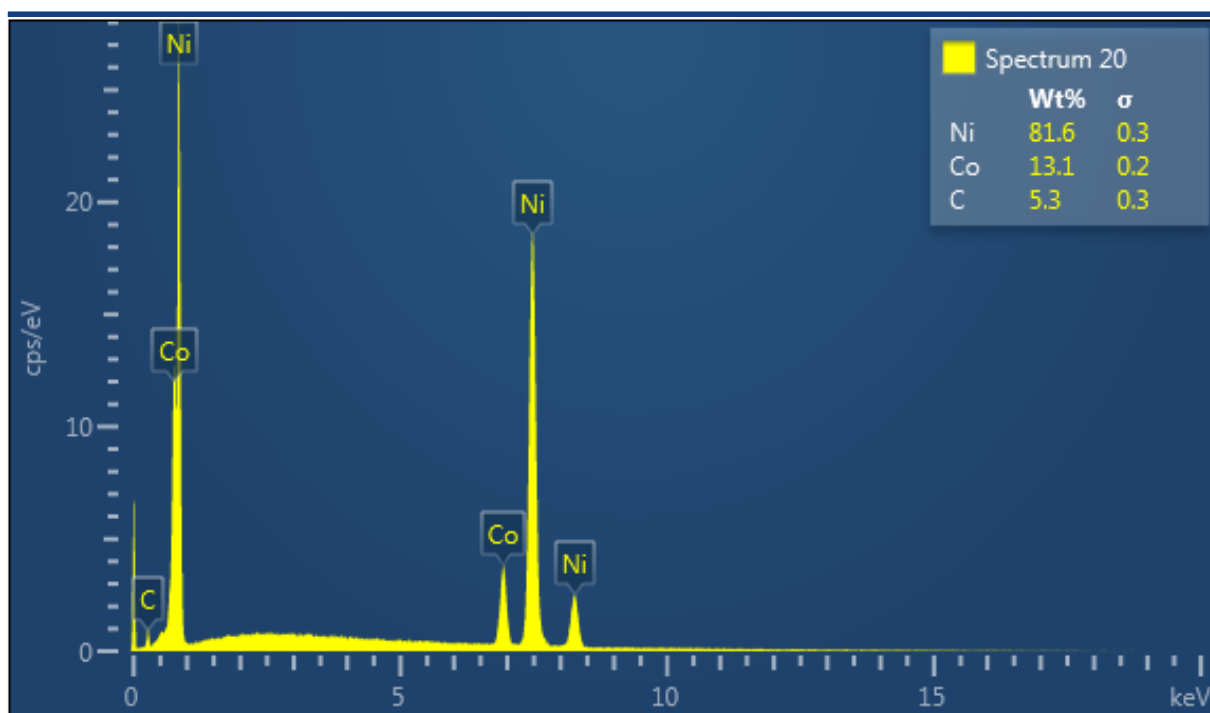
V tabulce 3.2 je souhrn chemického složení na různých místech vložky frosted 5°.



Obr. 33 Spektrum prvků na spodní straně vložky bez textury a povlaku



Obr. 34 Snímek odbroušeného místa na vložce



Obr. 35 Spektrum prvků uvnitř vložky, v místě odbroušení

Tab. 3.2 Přehled chemického složení v různých místech vložky frosted 5°.

	Ni [hm%]	C [hm%]	O [hm%]	Co [hm%]	Au [hm%]	Cr [hm%]
Chem. složení povlaku 1	28,1	32,6	14,1	5,3	17,6	2,3
Chem. složení spodní strana	73,3	21,5	3,8	1,4	-	-
Chem. složení uvnitř	81,6	5,3	-	13,1	-	-

### 3.1.3 Materiál vložek

Obě vložky mají stejný základní materiál, jak vyplývá z měření na elektronovém mikroskopu. Tento materiál má vysoký podíl niklového základu s příměsí kobaltu a uhlíku. Při hledání v databázích materiálů bylo zjištěno, že najít slitinu s podobným chemickým složením není vůbec snadné. Nejvíce se slitině, ze které jsou vložky vyrobeny, blíží slitiny:

- **Inconel 600**, slitina na bázi niklu, s vysokou odolností proti oxidaci a nauhličování povrchu za zvýšených teplot. Tato slitina má vysoký obsah niklu (min 72%), neobsahuje ale kobalt, má nízký obsah uhlíku a navíc obsahuje chrom [19,20].

Tab. 3.3 Deklarované chemické složení Inconel 600 [19,20].

	Ni (%)	Cr (%)	Cu (%)	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	Fe (%)
MIN	72	14	0	0	0	0	0	6
MAX	-	17	0,5	0,15	1	0,5	0,015	10,00

- **Nickel 200**, slitina s vysokým podílem niklu a kobaltu, s vysokou odolností proti žíravinám. Tato slitina kombinuje ty nejlepší vlastnosti niklu a kobaltu, má ale nízký podíl uhlíku [19,20].

**Tab. 3.4 Deklarované chemické složení Nickel 200 [19,20].**

	Ni + Co (%)	Mn (%)	Cu (%)	Si (%)	C (%)	Fe (%)	S (%)
MIN	99,0	-	-	-	-	-	-
MAX	-	0,35	0,25	0,35	0,15	0,40	0,01

Ani jedna z vybraných slitin není ideální, ale svým chemickým složením se velmi blíží slitině, z níž jsou vložky vyrobeny. V příloze 2 a 3 jsou podrobnější informace k oběma slitinám. Obě vložky také mají na straně textury povlak s vysokým obsahem zlata, uhlíku a niklu.

### 3.2 Měření drsnosti povrchu vložek

Pro měření drsnosti povrchu (textury) vložek byly zvoleny dvě metody, a to metoda bezdotyková konfokálním laserovým mikroskopem (CLM) pro měření drsnosti v prostoru a metoda dotyková přenosným ručním drsnoměrem TR100 SRT pro měření drsnosti v profilu.

#### 3.2.1 Konfokální laserový mikroskop

Měření na konfokálním laserovém mikroskopu probíhalo ve spolupráci se společností Ceplant. Ta disponuje mikroskopem Lext OLS4000 3D (obr. 36).

Parametry mikroskopu Lext OLS4000 3D [17]:

- optický systém: UIS2 s korekcí na nekonečno,
- celkové zvětšení 108× – 17280×,
- výměnné objektivy se zvětšením 5×, 10×, 20×, 50×, 100×,
- optický zoom: 1× – 8×,
- pozorovací metoda: BF / DIC / Laser / Laser Confokal DIC.



Obr. 36 Konfokální laserový mikroskop Lext OLS4000 3D [17]

### 3.2.2 Drsnoměr TR100 SRT

Měření na přenášném ručním drsnoměru TR100 SRT (obr. 37) probíhalo v laboratoři Ústavu strojírenské technologie VUT Brno.

Vlastnosti ručního drsnoměru TR100 SRT:

- snadné použití na vnější plochy,
- měří parametry drsnosti  $R_a$  (0,05 až 10  $\mu\text{m}$ ) a  $R_z$  (0,1 až 50  $\mu\text{m}$ ),
- měřicí délky: 1,25 mm; 4,0 mm; 5,0 mm,
- cut-off délky  $\lambda$ : 0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm,
- napájení na baterie i z elektrické sítě.



Obr. 37 Ruční drsnoměr TR100 SRT

### 3.2.3 Měření drsnosti vložky frosted 20°

Pro měření drsnosti na konfokálním laserovém mikroskopu se využívá objektiv se zvětšením 50 $\times$ . Byla vybrána oblast (obr. 38), kde je viditelné co nejmenší poškození a poškrábání textury vložky, a byly vyhodnoceny různé parametry drsnosti povrchu (příloha 4). Pro porovnání pak byly vybrány parametry střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$  a největší výška profilu  $R_z$  viz následující tabulka.

Tab. 3.5 Vybrané hodnoty drsnosti vložky frosted 20°

Frosted 20°	
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	1,433
$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	8,710



Obr. 38 Snímek vybrané oblasti pro měření drsnosti na mikroskopu Lext

Měření na přenosném drsnoměru TR100 SRT bylo provedeno vícekrát v různých směrech a na různých místech textury.

Tab. 3.6 Vybrané hodnoty drsnosti vložky frosted 20°

Frosted 20°		
měření č.	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>z</sub> (μm)
1	1,26	8,7
2	1,33	8,5
3	1,38	8,9
4	1,44	10,6
5	1,36	9,1
<b>aritmetický průměr</b>	<b>1,35</b>	<b>9,16</b>

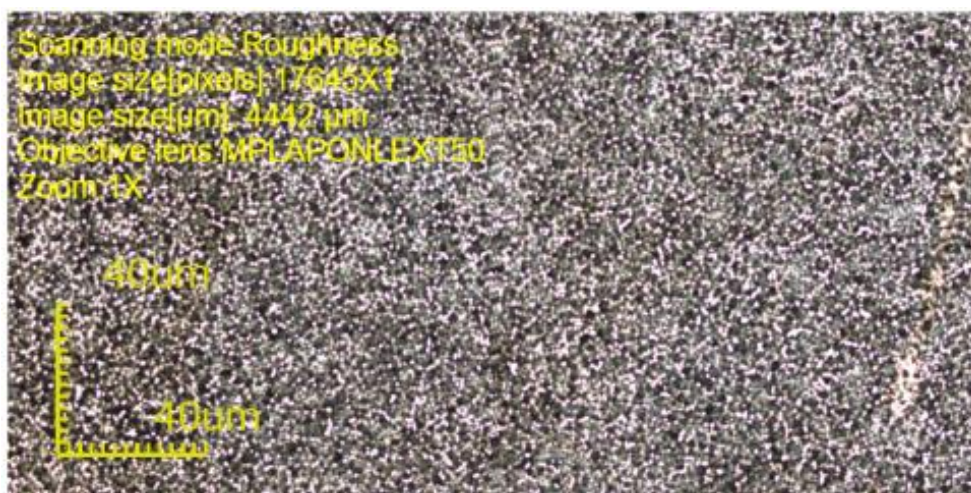
### 3.2.4 Měření drsnosti vložky frosted 5°

Na konfokálním laserovém mikroskopu byla vybrána oblast (obr. 39), kde není poškození a poškrábání textury vložky viditelné, a byly vyhodnoceny různé parametry drsnosti povrchu (příloha 5). Pro porovnání pak byly vybrány parametry střední aritmetická úchylka profilu R<sub>a</sub> a největší výška profilu R<sub>z</sub> viz následující tabulka.



**Tab. 3.7 Vybrané hodnoty drsnosti vložky frosted 20°**

Frosted 5°	
$R_a$ (μm)	1,102
$R_z$ (μm)	6,369



Obr. 39 Snímek vybrané oblasti pro měření drsnosti na mikroskopu Lext

Měření na přenosném drsnoměru TR100 SRT bylo provedeno vícekrát v různých směrech a na různých místech textury.

**Tab. 3.8 Vybrané hodnoty drsnosti vložky frosted 20°**

Frosted 5°		
měření č.	$R_a$ (μm)	$R_z$ (μm)
1	0,99	6,6
2	1,14	8,1
3	0,89	5,8
4	0,97	6,8
5	1,01	6,5
<b>aritmetický průměr</b>	<b>1,0</b>	<b>6,76</b>

### 3.2.5 Výpočty statistických veličin pro hodnoty naměřené dotkovým drsnoměrem TR100 SRT

Statistické vyhodnocení parametrů přesnosti měřené plochy interpretují statistické veličiny, které pomáhají sledovat rozložení jednotlivých hodnot.

- **VLOŽKA FROSTED 20°**

- **Průměrná aritmetická úchylka profilu  $R_a$**

1. *Odhad střední hodnoty*

$$\bar{R}_a = \frac{1}{n} \sum_i R_{ai}$$

$$\bar{R}_a = \frac{1}{5} \cdot (1,26 + 1,33 + 1,38 + 1,44 + 1,36) = \underline{1,354 \mu m}$$

2. *Odhad směrodatné odchylky*

$$s_{Ra} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (R_{ai} - \bar{R}_a)^2}$$

$$s_{Ra} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot (0,00884 + 0,00576 + 0,00676 + 0,00740 + 0,000036)} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 0,01752} = \underline{0,662 \mu m}$$

3. *Jednostranný konfidenční interval střední hodnoty, horní mez, konfidenční úroveň  $1-\alpha=0,95$ ;  $n-1=4$ ;  $t_{1-\alpha/2, n-1}=2,132$*

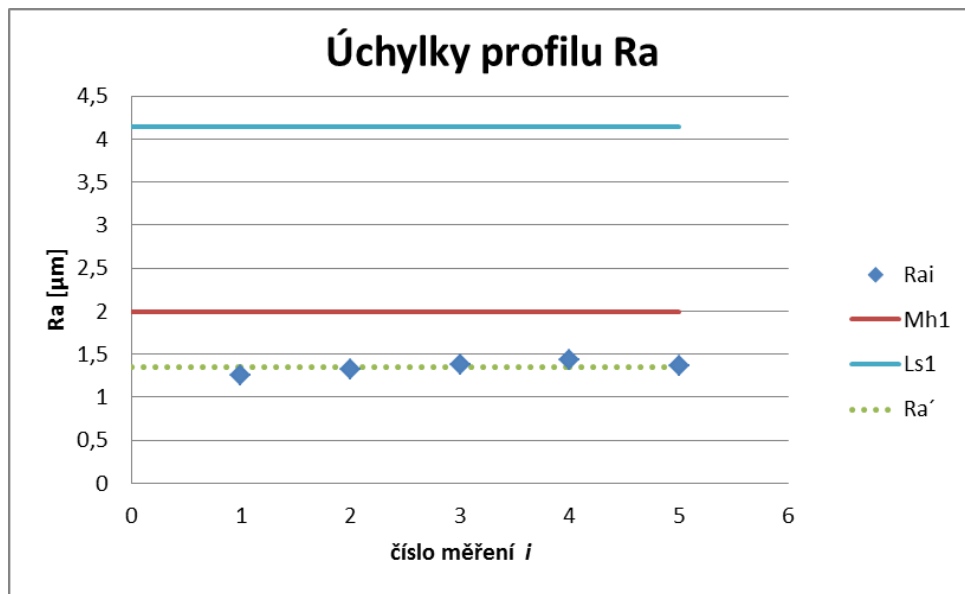
*Horní konfidenční mez*

$$m_{H1} = \bar{R}_a + t_{1-\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s_{Ra}}{\sqrt{n}} = 1,354 + 2,132 \cdot \frac{0,662}{\sqrt{5}} = \underline{1,985 \mu m}$$

4. *Jednostranný statistický toleranční interval, horní mez, konfidenční úroveň  $1-\alpha=0,95$ ; podíl souboru  $p=0,95$ ;  $k_1=4,21$*

*Horní konfidenční mez*

$$L_{S1} = \bar{R}_a + k_1 \cdot s_{Ra} = 1,354 + 4,21 \cdot 0,662 = \underline{4,141 \mu m}$$

Obr. 40 Úchylky profilu  $R_a$  vložky frosted 20°

○ **Nejvyšší výška profilu  $R_z$**

1. *Odhad střední hodnoty*

$$\bar{R}_z = \frac{1}{n} \sum_i R_{zi}$$

$$\bar{R}_z = \frac{1}{5} \cdot (8,7 + 8,5 + 8,9 + 10,6 + 9,1) = \underline{9,16 \mu m}$$

2. *Odhad směrodatné odchylky*

$$s_{R_z} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (R_{zi} - \bar{R}_z)^2}$$

$$s_{R_z} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot (0,2116 + 0,4356 + 0,0676 + 2,0736 + 0,0036)} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 2,792} = \underline{0,835 m}$$

3. *Jednostranný konfidenční interval střední hodnoty, horní mez, konfidenční úroveň  $1-\alpha=0,95$ ;  $n-1=4$ ;  $t_{1-\alpha/2, n-1}=2,132$*

*Horní konfidenční mez*

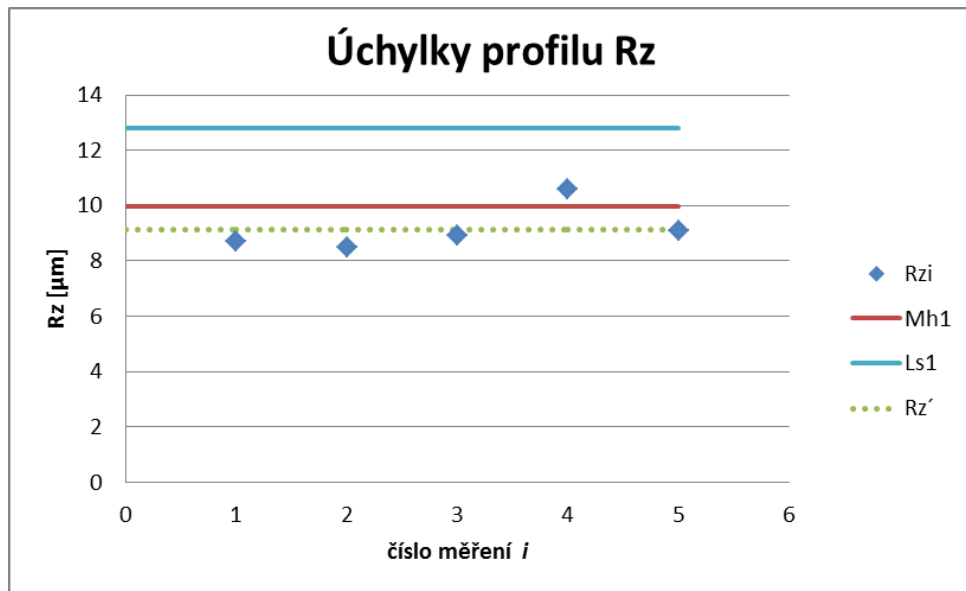
$$m_{H1} = \bar{R}_z + t_{1-\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s_{R_z}}{\sqrt{n}} = 9,16 + 2,132 \cdot \frac{0,835}{\sqrt{5}} = \underline{9,956 \mu m}$$



4. *Jednostranný statistický toleranční interval, horní mez, konfidenční úroveň  $1-\alpha=0,95$ ; podíl souboru  $p=0,95$ ;  $k_1=4,21$*

*Horní konfidenční mez*

$$L_{S1} = \bar{R}_z + k_1 \cdot s_{Rz} = 9,16 + 4,21 \cdot 0,835 = \underline{12,675 \mu m}$$



Obr. 41 Úchylky profilu  $R_z$  vložky frosted 20°

• **VLOŽKA FROSTED 5°**

○ **Průměrná aritmetická úchylka profilu  $R_a$**

1. *Odhad střední hodnoty*

$$\bar{R}_a = \frac{1}{n} \sum_i R_{ai}$$

$$\bar{R}_a = \frac{1}{5} \cdot (0,99 + 1,14 + 0,89 + 0,97 + 1,01) = \underline{1,0 \mu m}$$

2. *Odhad směrodatné odchylky*

$$s_{Ra} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (R_{ai} - \bar{R}_a)^2}$$

$$s_{Ra} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot (0,0001 + 0,0196 + 0,0121 + 0,0009 + 0,0001)} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 0,0328} = \underline{0,091 \mu m}$$

3. Jednostranný konfidenční interval střední hodnoty, horní mez, konfidenční úroveň  $1-\alpha=0,95$ ;  $n-1=4$ ;  $t_{1-\alpha/2, n-1}=2,132$

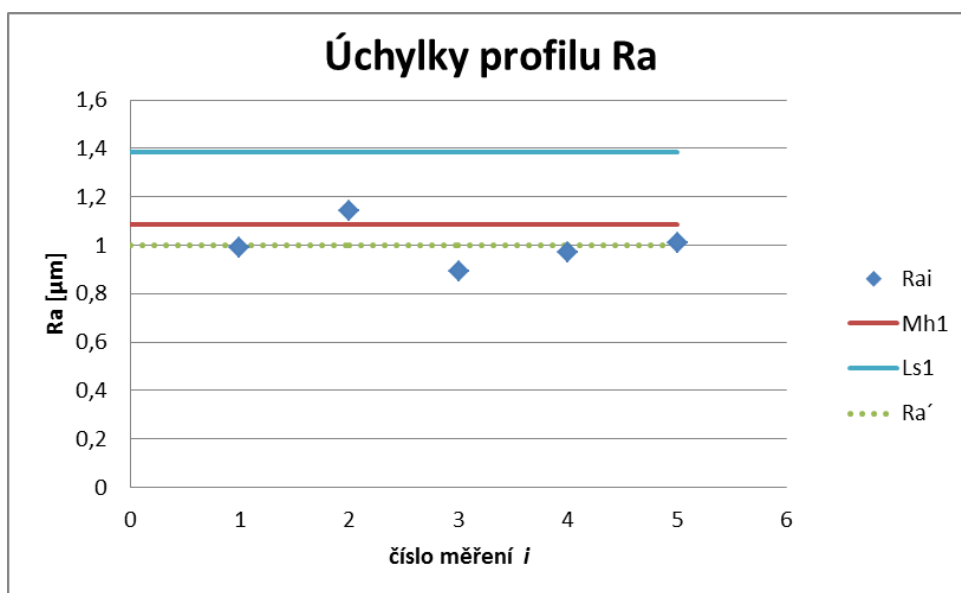
Horní konfidenční mez

$$m_{H1} = \bar{R}_a + t_{1-\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s_{Ra}}{\sqrt{n}} = 1,0 + 2,132 \cdot \frac{0,091}{\sqrt{5}} = \underline{1,087 \mu m}$$

4. Jednostranný statistický toleranční interval, horní mez, konfidenční úroveň  $1-\alpha=0,95$ ; podíl souboru  $p=0,95$ ;  $k_1=4,21$

Horní konfidenční mez

$$L_{S1} = \bar{R}_a + k_1 \cdot s_{Ra} = 1,0 + 4,21 \cdot 0,091 = \underline{1,383 \mu m}$$



Obr. 42 Úchylky profilu  $R_a$  vložky frosted  $5^\circ$

#### ○ Nejvyšší výška profilu $R_z$

1. Odhad střední hodnoty

$$\bar{R}_z = \frac{1}{n} \sum_i R_{zi}$$

$$\bar{R}_z = \frac{1}{5} \cdot (6,6 + 8,1 + 5,8 + 6,8 + 6,5) = \underline{6,76 \mu m}$$

## 2. Odhad směrodatné odchylky

$$s_{R_z} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (R_{zi} - \bar{R}_z)^2}$$

$$s_{R_z} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot (0,0258 + 1,7956 + 0,9216 + 0,0016 + 0,0676)} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 2,812} = \underline{0,838 \mu m}$$

## 3. Jednostranný konfidenční interval střední hodnoty, horní mez, konfidenční úroveň $1-\alpha=0,95$ ; $n-1=4$ ; $t_{1-\alpha/2, n-1}=2,132$

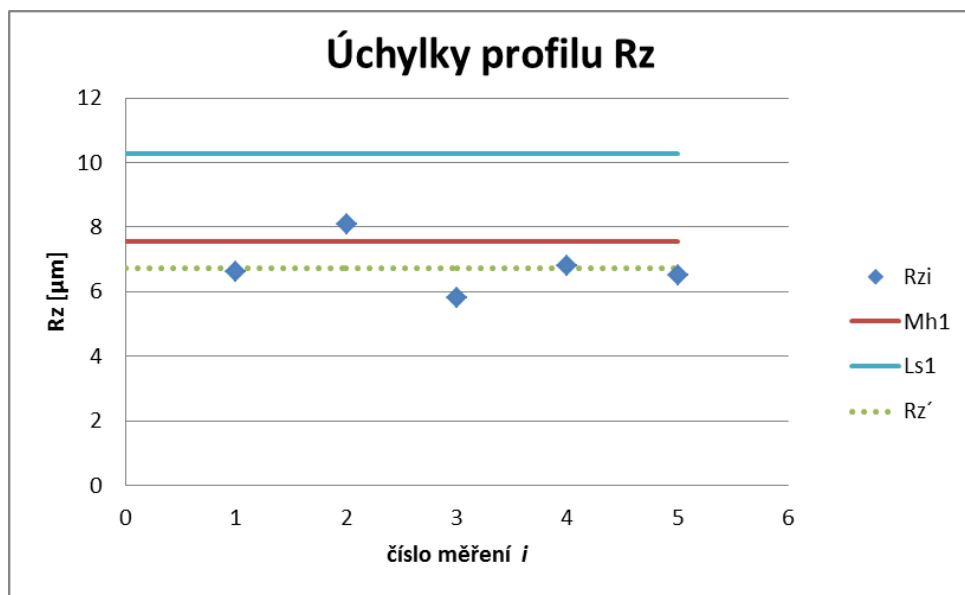
Horní konfidenční mez

$$m_{H1} = \bar{R}_z + t_{1-\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s_{R_z}}{\sqrt{n}} = 6,76 + 2,132 \cdot \frac{0,838}{\sqrt{5}} = \underline{7,559 \mu m}$$

## 4. Jednostranný statistický toleranční interval, horní mez, konfidenční úroveň $1-\alpha=0,95$ ; podíl souboru $p=0,95$ ; $k_1=4,21$

Horní konfidenční mez

$$L_{S1} = \bar{R}_z + k_1 \cdot s_{R_z} = 6,76 + 4,21 \cdot 0,838 = \underline{10,288 \mu m}$$



Obr. 43 Úchylky profilu  $R_z$  vložky frosted 5°

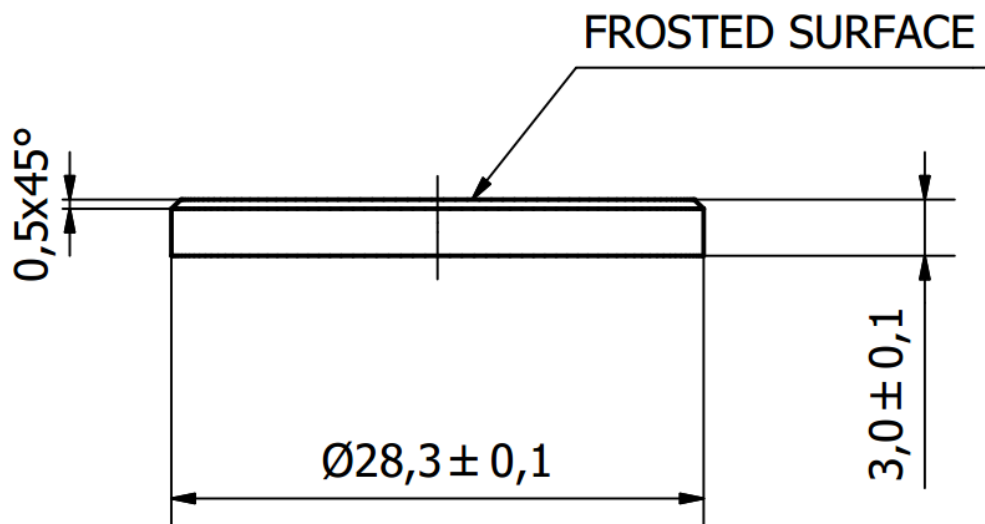
Z vytvořených grafů (obr. 40-43) je patrné velmi podobné rozložení jednotlivých hodnot pro střední aritmetickou úchylku profilu  $R_a$  a největší výšku profilu  $R_z$  pro každou z vložek s texturou frosted 20° a frosted 5°.

## 4 POSOUZENÍ TECHNOLOGIČNOSTI DÍLU, VYPRACOVÁNÍ KONSTRUKČNÍHO NÁVRHU VLOŽKY

Ze snímků z elektronového mikroskopu lze usoudit, že textura na povrchu byla vytvořena pravděpodobně elektroerozivním obráběním, případně gravírováním laserem, protože na povrchu jsou vidět různé krátery a prohlubně, které vznikly postupným odtavováním materiálu. Elektroerozivní obrábění i laserové obrábění patří k běžným technologiím využívaným při výrobě forem pro vstřikování plastů, proto je velmi pravděpodobné, že jedna z těchto metod byla použita i na tyto konkrétní vložky formy.

### 4.1 Konstrukční návrh vložky

Konstrukční návrh vložky vychází z originálů vložek konkrétní formy. Byla zvolena forma CT870104, ze které se vyrábí optiky 26,5 mm, a byly vybrány konkrétní typy optik – díl 10392 s texturou frosted 5° a díl 10393 s texturou frosted 20°. Výhoda těchto dvou dílů spočívá v tom, že jsou rozměrově úplně stejné. Lze je tedy lisovat ve stejné formě s použitím stejných tvárníků, liší se pouze vložky tvořící matný povrch na optice, viz příloha 6 a 7. Rozměry vložky znázorňuje obrázek 44.



Obr. 44 Rozměry vložky pro optiku 26,5 mm

## 5 NÁVRH DOSTUPNÉ TECHNOLOGIE PRO VÝROBU

### 5.1 Výběr technologie

Jednou s nejdostupnějších technologií, která nachází uplatnění při výrobě nebo opravách vstřikovacích forem, je elektroerozivní obrábění. Jak je dobře patrné ze snímků z elektronového mikroskopu v kapitole 3, textura je tvořena různými krátery a prohlubněmi, které jsou typické právě pro elektroerozivní obrábění. Dalším ukazatelem, který vede k metodě elektroerozivního obrábění, je použitý materiál, který se díky svému chemickému složení řadí k těžkoobrobitelným běžnými konvenčními technologiemi.

Z těchto důvodů byla na realizaci vzorků vybrána technologie elektroerozivního obrábění. Protože společnost, v jejíž spolupráci byla realizována výroba vzorků optik, nedisponuje požadovaným strojovým parkem elektroerozivních obráběcích strojů, byla navázána spolupráce s externí firmou.

Z důvodu těžkoobrobitelnosti materiálu byla zvolena technologie elektroerozivního drátového řezání na výrobu polotovaru vložky a na samotnou výrobu textury byla vybrána technologie elektroerozivního hloubení.

### 5.2 Výběr materiálu

Vybrané materiály Inconel 600 a Nickel 200 nepatří mezi běžně dostupné materiály na českém trhu. Doba dodání konkrétních hutních polotovarů se pohybuje kolem třech měsíců a jejich cena je značně vysoká. Z těchto důvodů byl pro účely této diplomové vybrán jiný materiál Inconel 718, který byl dostupný ve skladu společnosti. Tento materiál se liší svým chemickým složením od původních vybraných materiálů (viz tab. 5.1), ale řadí se také mezi superslitiny typu Inconel, tedy na bázi niklového základu. Obsahuje více přísad, například vysoké množství chromu a železa, dále niob s tantalem, molybden, stopové množství různých dalších prvků jako je mangan, křemík, fosfor atd.

**Tab. 5.1 Deklarované chemické složení Inconel 718 [19,20].**

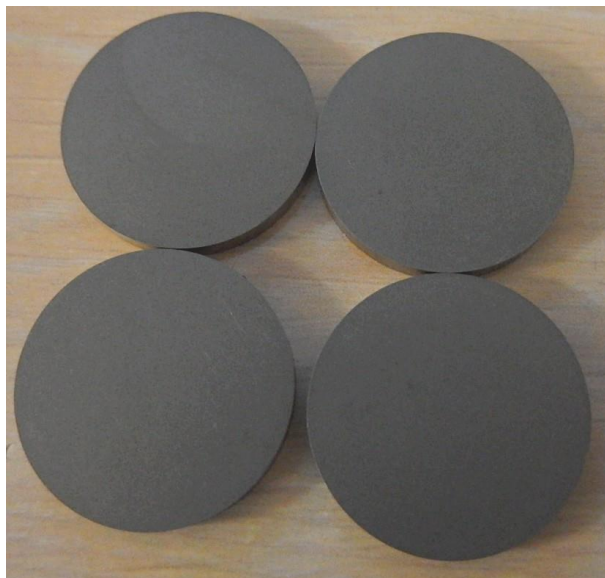
	Ni +Co (%)	Cr (%)	Nb +Ta (%)	Mo (%)	Ti (%)	Al (%)	Co (%)	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	B (%)	Cu (%)	Fe (%)
MIN	50	17	4,75	2,8	0,65	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MAX	55	21	5,5	3,3	1,15	0,8	1,0	0,08	0,35	0,35	0,015	0,015	0,006	0,3	zbytek



## 6 REALIZACE VZORKU

### 6.1 Realizace vzorků vložek do formy s frosted texturou

Realizace vzorku probíhala v kooperaci s externí firmou, která se specializuje na výrobu a opravy vstřikovacích forem. Nejdříve byly ze zvoleného materiálu Inconel 718, který byl ve formě plechu, vyrobeny polotovary vložek podle výkresu. Polotovary vložek (obr. 45) byly vyráběny pomocí elektroerozivní drátové řezačky od firmy Accutex. Nejdříve byly vyřezány válce o průměru 28,3 mm, které byly následně rozřezány na ploché vložky o tloušťce 3 mm.



Obr. 45 Připravené polotovary vložek

Pro vytvoření správného povrchu s frosted texturou byl použit elektroerozivní obráběcí stroj od firmy Mitsubishi. Základní nastavení stroje vycházelo z naměřených hodnot  $R_a$  a ze stupnice VDI. V pokusu 1 byly vytvořeny dva vzorky textur pro povrch frosted 20° a dva vzorky pro povrch 5°. Po ověření vyrobených vzorků vložek (viz kapitola 7), byly upraveny parametry elektroerozivního obrábění a byl realizován pokus 2, kdy byly opět vytvořeny dva vzorky frosted 20° a dva vzorky frosted 5°.

Parametry nastavení stroje zde nejsou uvedeny z důvodu zachování know-how a z důvodu zákona o vysokých školách 111/1998 Sb. § 47 b. Zveřejňování závěrečných prací.

Tab. 6.1 Vzorky vložek s texturami

	FROSTED 20°	FROSTED 5°
<b>POKUS 1</b>	Vzorek DP1	Vzorek DP3
	Vzorek DP2	Vzorek DP4
<b>POKUS 2</b>	Vzorek DP5	Vzorek DP7
	Vzorek DP6	Vzorek DP8

## 6.2 Realizace vzorků optik

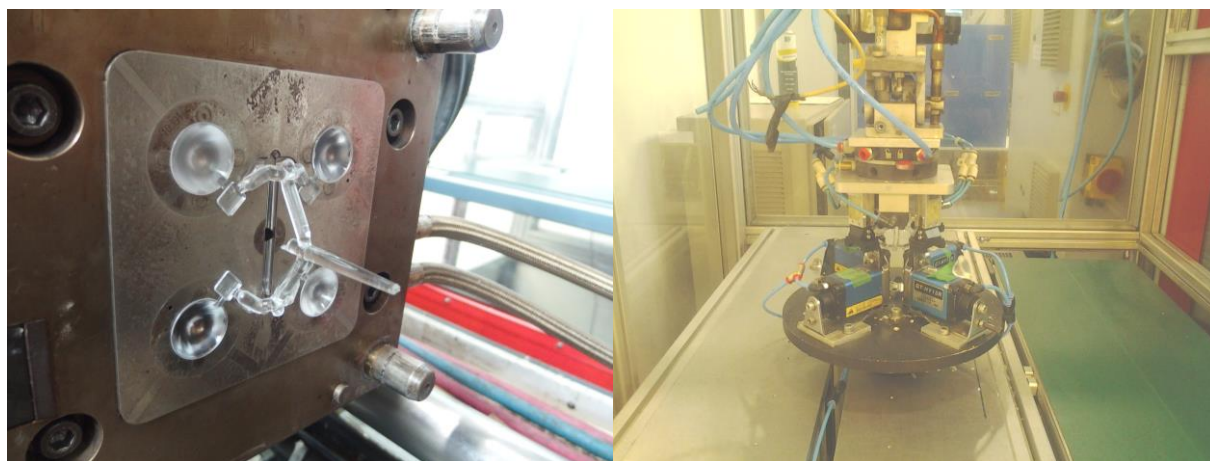
Protože základní ověření správně vytvořeného povrchu lze provést jen na konečném výlisku (viz kapitola 7), bylo nutné vyrobit konkrétní optiky. Výhodou zvolené formy je možnost současné výroby obou dvou typů optik. Důležitou roli hraje použití vložky se správným frosted povrchem a správné sestavení formy tak, aby konečné výlisky měli po vychladnutí správné rozměry dle výkresu.

Pro výrobu těchto optik se používá speciální čirý polykarbonát Lexan LS2, u kterého výrobce deklaruje stálost barvy (průhlednosti) za působení vnějších vlivů jako je např. UV záření. Podrobnější vlastnosti polykarbonátu shrnuje příloha 8. Výroba vzorků optik probíhala na vstřikovacím stroji Ferromatik Milacron K85 (obr. 46) vybaveným robotickým podavačem dílů a pneumatickými nůžkami (obr. 47).

Bylo vylisováno několik optik za použití všech vzorků vložek (DP1 – 8). Výroba optik probíhala dvakrát. Poprvé byly ve formě nastaveny vložky DP1, DP2 a DP3, DP4. Podruhé DP5, DP6 a DP7, DP8. Vzorky optik byly následně připraveny pro porovnání.



Obr. 46 Vstřikovací stroj Ferromatik Milacron K85

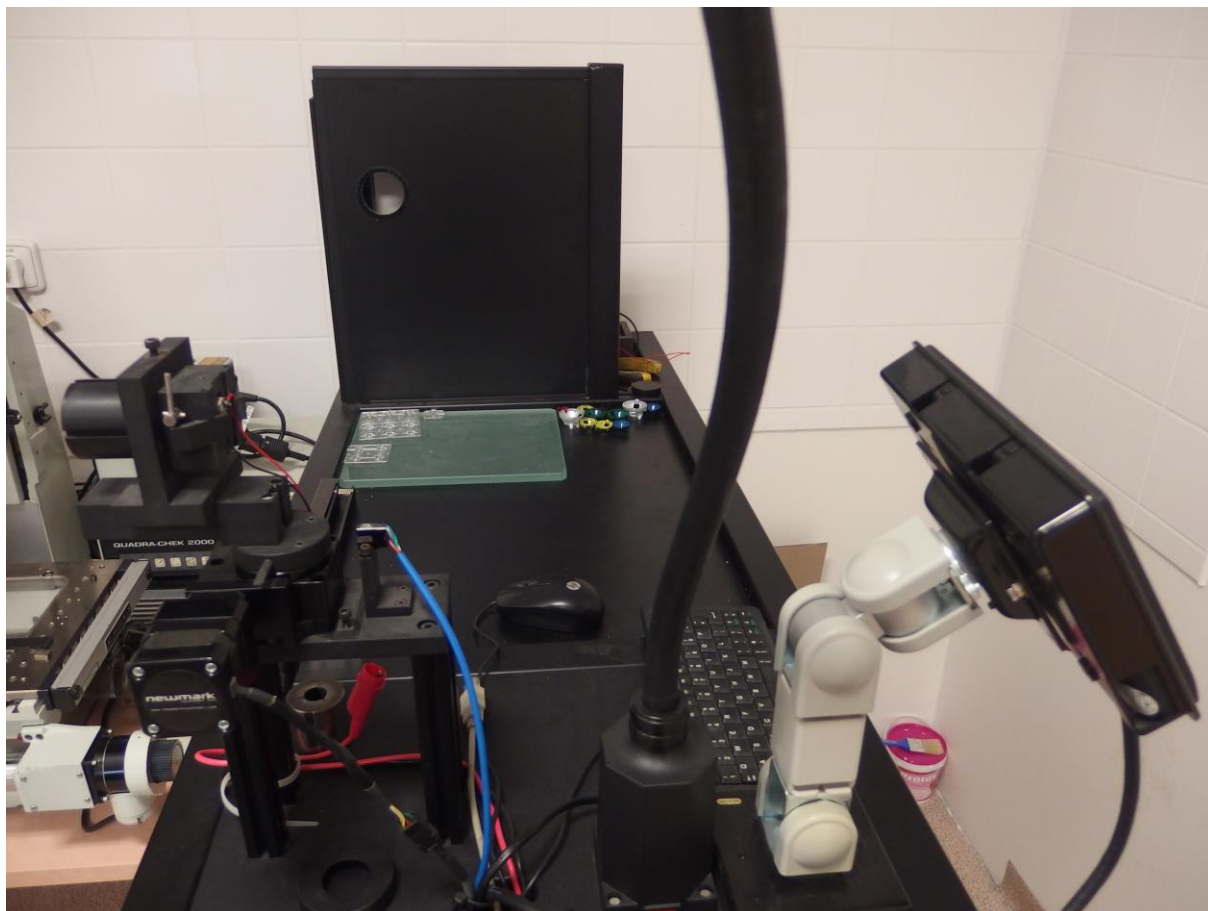


Obr. 47 Fotografie z výroby vzorků optik

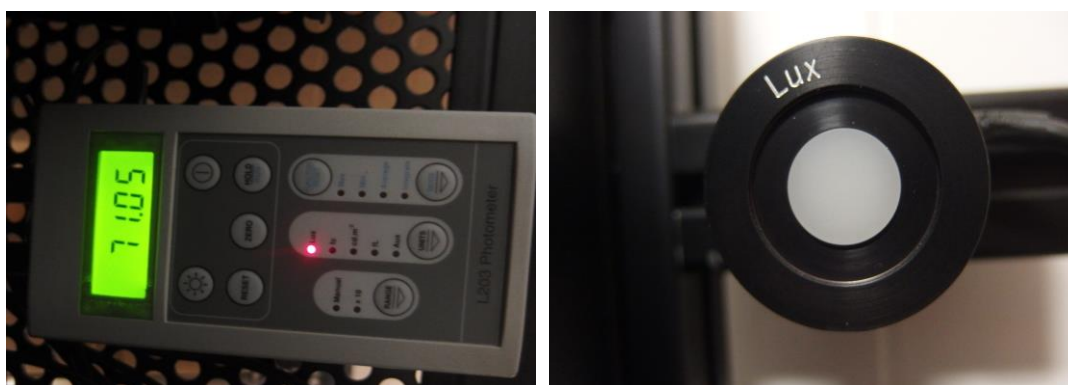
## 7 VYHODNOCENÍ VZORKŮ A POROVNÁNÍ S ORIGINÁLEM

Pro vyhodnocení vzorků optik a tedy i frosted textury byl použit základní měřicí přístroj s názvem ILMA (obr. 48). Přístroj pracuje na principu porovnání vztažného vzorku schváleného zákazníkem s daným vzorkem standardní produkce.

Hlavní části přístroje jsou: přidržovač optiky se světelným LED zdrojem, krokový motor, fotometr L203 s detektorem pro měření osvětlení a svítivosti (obr. 49), stínítko s úzkou kruhovou štěrbinou, programovatelný napájecí zdroj ISO-TECH 2010, počítač, který vše vyhodnocuje a řídí, monitor, klávesnice, myš, potřebná kabeláž a kostra přístroje.



Obr. 48 Přístroj ILMA



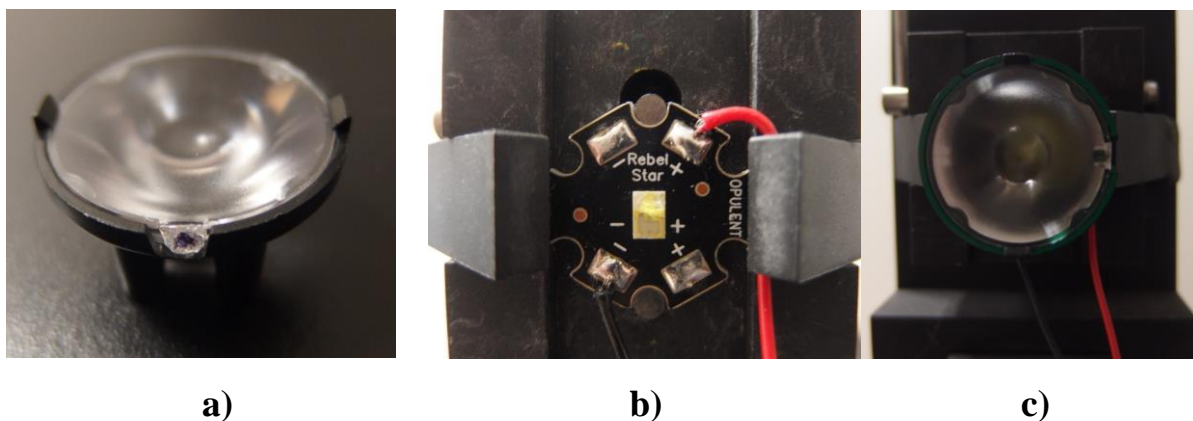
Obr. 49 Fotometr L203 s detektorem

## 7.1 Princip přístroje

Nejdříve je nutné v příslušném režimu softwaru nahrát data ze vztažného vzorku. Optika se vloží do příslušného držáku (obr. 50a) a upne se do přidržovače tak, že nožičky držáku se vloží do výseků v LED diodě (obr. 50b) typu Rebel-star (konkrétní typ 3PW51), což zajistí vždy stále stejnou polohu optiky vůči LED diodě.

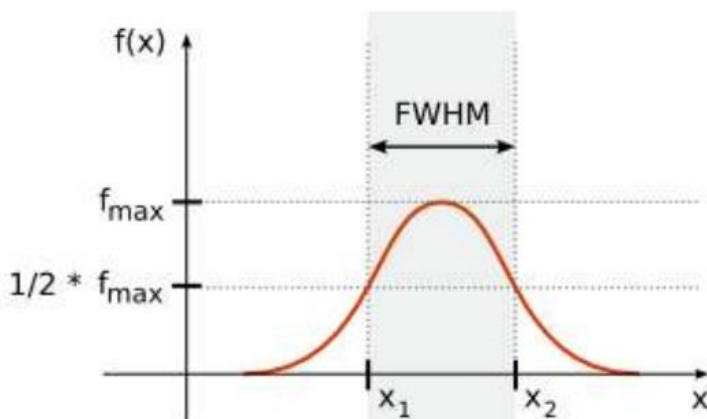
Po spuštění programu krokový motor natočí přidržovač s upnutou optikou (obr. 50c) do požadovaného počátečního úhlu (dán specifikací a nastaven v softwaru automaticky). Dojde k rozsvícení LED diody, která svítí přes optiku na stínítko, ve kterém je kruhový otvor, a za ním je upevněn detektor napojený na fotometr. Krokový motor postupně otáčí přidržovačem po jednom stupni v požadovaném rozmezí úhlů a v každém tomto bodě fotometr zaznamená hodnotu svítivosti. Tím se vytvoří křivka závislosti svítivosti na úhlu pootočení. Kolem křivky se po dokončení měření vytvoří žluté toleranční pole, ve kterém by se měly křivky dalších měřených dílů pohybovat.

Další důležitá hodnota, která je určena z vytvořené křivky, je vyzařovací úhel optiky, kterým je charakterizována každá sestava optiky a LED diody. Tato hodnota je vyjádřena jako FWHM (Full Width Half Maximum), což je vzdálenost mezi dvěma body na křivce, které vzniknou tak, že křivku protne rovnoběžka s osou  $x$  v polovině výšky píku (obr. 51) [21].



a) LED dioda s přidržovačem, b) optika v držáku, c) optika upnutá v přidržovači

Obr. 50 Fotografie optiky upnuté na přístroj ILMA

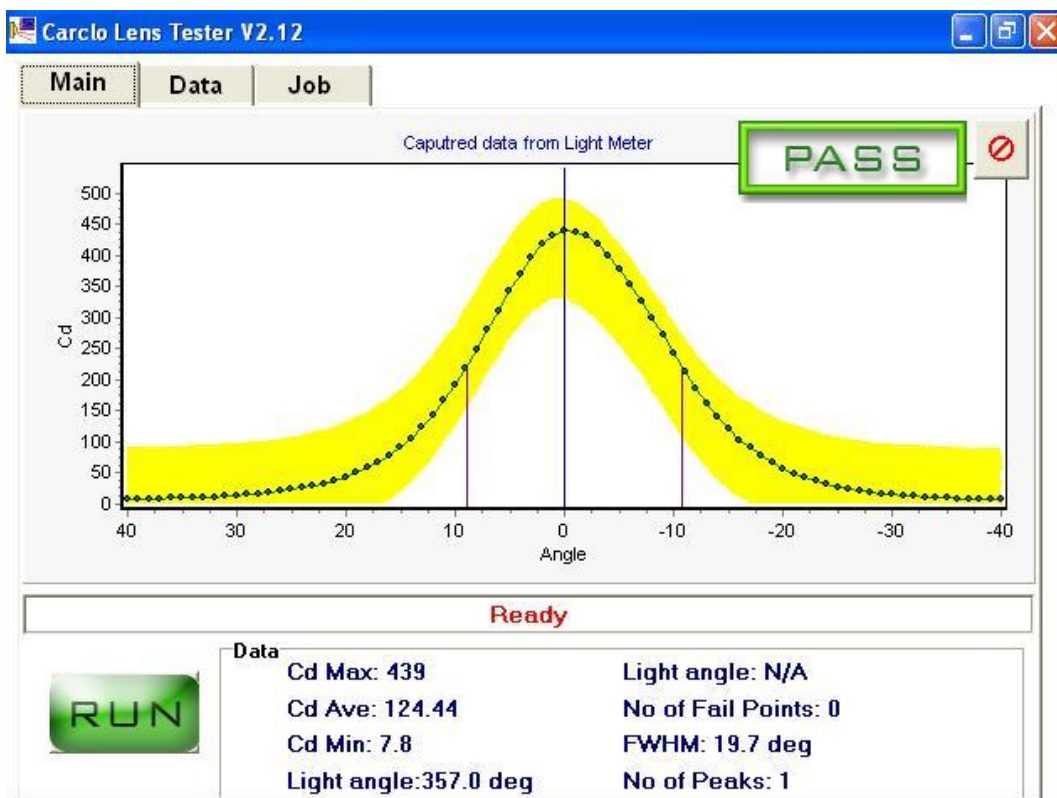


Obr. 51 Určení vzdálenosti FWHM [21]



Po nahrání dat z porovnávacího vzorku (obr. 52) je pak možné příslušné optiky upnout do držáku a přidržovače a stejným způsobem ověřit, zda světlo procházející přes optiku vytvoří křivku, která bude ležet v daném tolerančním poli, a zároveň bude i naměřená hodnota FWHM ležet ve svém tolerančním poli.

Tímto způsobem bylo ověřeno, zda navzorované frosted povrchy jsou podobné porovnávacímu vzorku nebo nikoliv.



Obr. 52 Nahraná data ze vzorového dílu optiky 10393

## 7.2 Vyhodnocení vzorků

Na přístroji ILMA bylo vybráno konkrétní nastavení pro díly 10392 a 10393 a nahrány hodnoty z porovnávacích vzorků.

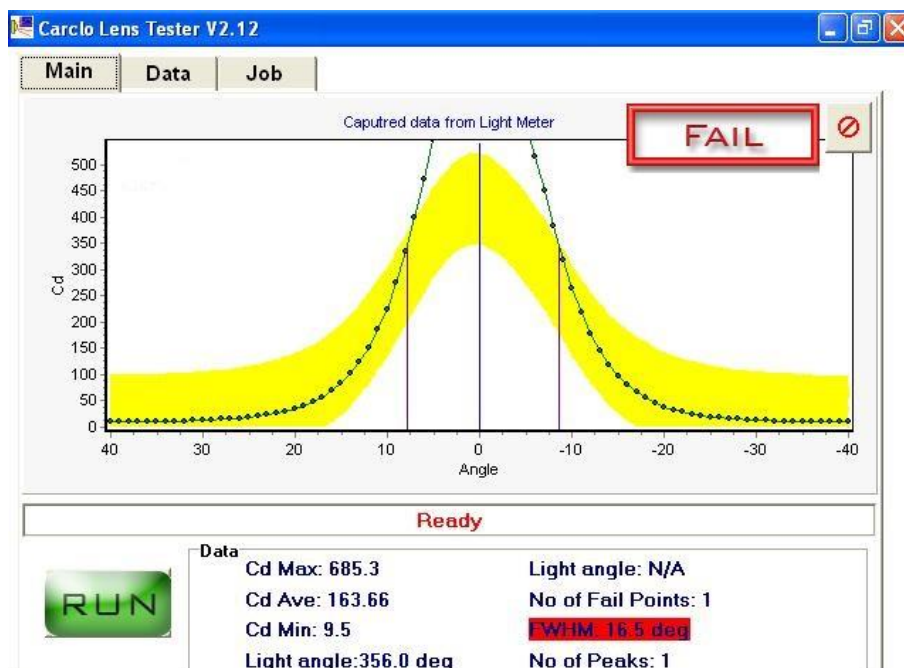
Tab. 7.1 Nastavení přístroje ILMA

optika	FWHM	rozmezí FWHM	max. osvětlení	středí hodnota osvětlení	rozmezí křivky	počáteční úhel měření	koncový úhel měření
10392	13,0	± 20%	1800 Cd	1500 Cd	± 20%	+25°	-25°
10393	21,1	± 20%	540 Cd	450 Cd	± 20%	+40°	-40°

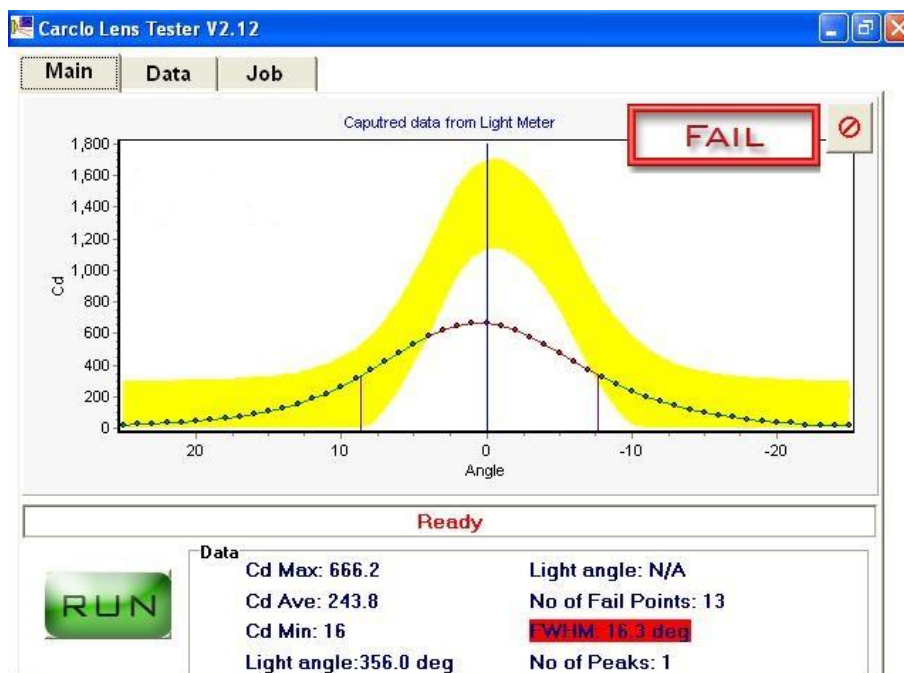


### 7.2.1 Vyhodnocení pokusu 1

Z pokusu 1, kdy byly použity vložky DP1 a DP2 pro optiku 10393 a vložky DP3 a DP4 pro optiku 10392, neprošel ani jeden vzorek. Jak je patrné z obrázku 53, hodnota osvětlení byla v případě optiky 10393 moc vysoká, tedy vytvořená textura na vložce dostatečně nezmatní povrch optiky. V případě optiky 10392 (obr. 54) byla hodnota osvětlení moc nízká, povrch optiky byl zmatněn příliš.



Obr. 53 Vyhodnocení optiky s vložkou DP2 podle originálu 10393

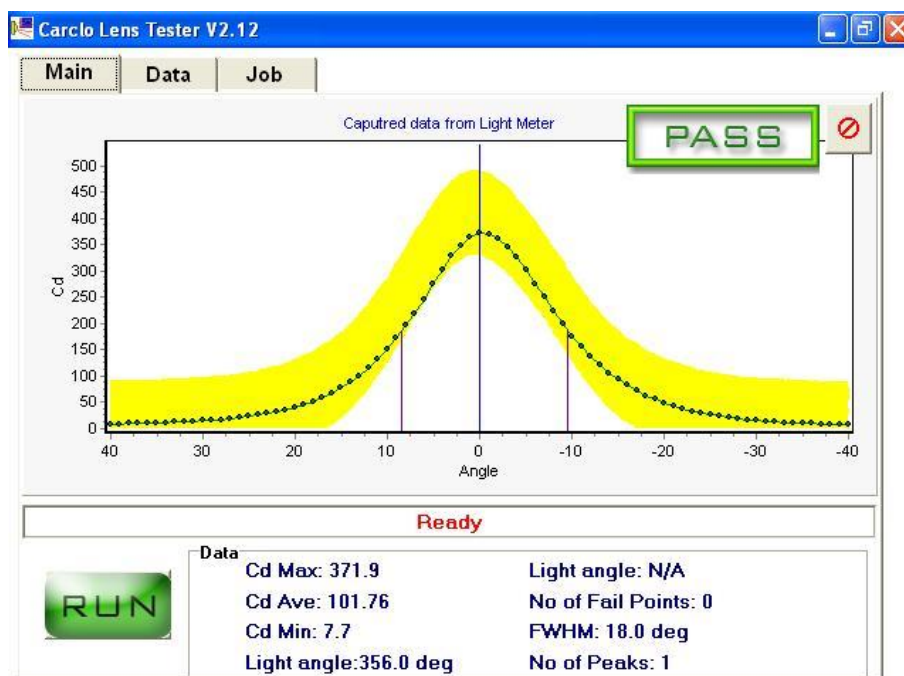


Obr. 54 Vyhodnocení optiky s vložkou DP3 podle originálu 10392

## 7.2.2 Vyhodnocení pokusu 2

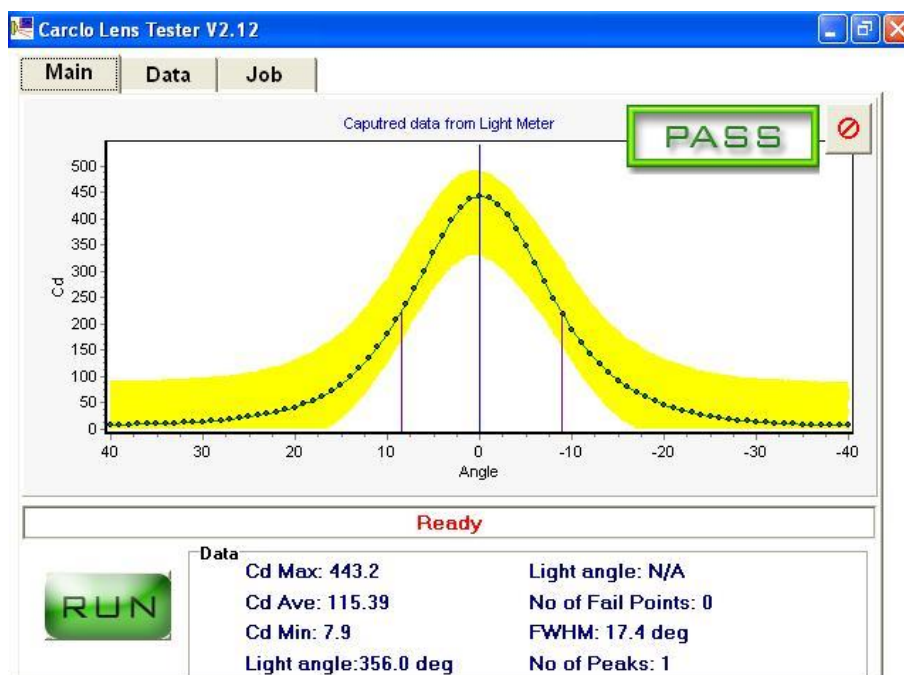
Protože pokus 1 neprošel ověřením, byl proveden pokus 2. Došlo k úpravě parametrů obrábění a byly vytvořeny další vzorky povrchů vložek DP 5 – 8, z kterých bylo navzorováno několik dalších optik, které byly opět ověřeny na přístroji ILMA.

- Vzorek DP5 prošel ověřením pro optiku 10393 (obr. 55), ale hodnota maximální svítivosti byla nižší než u vzorového dílu.



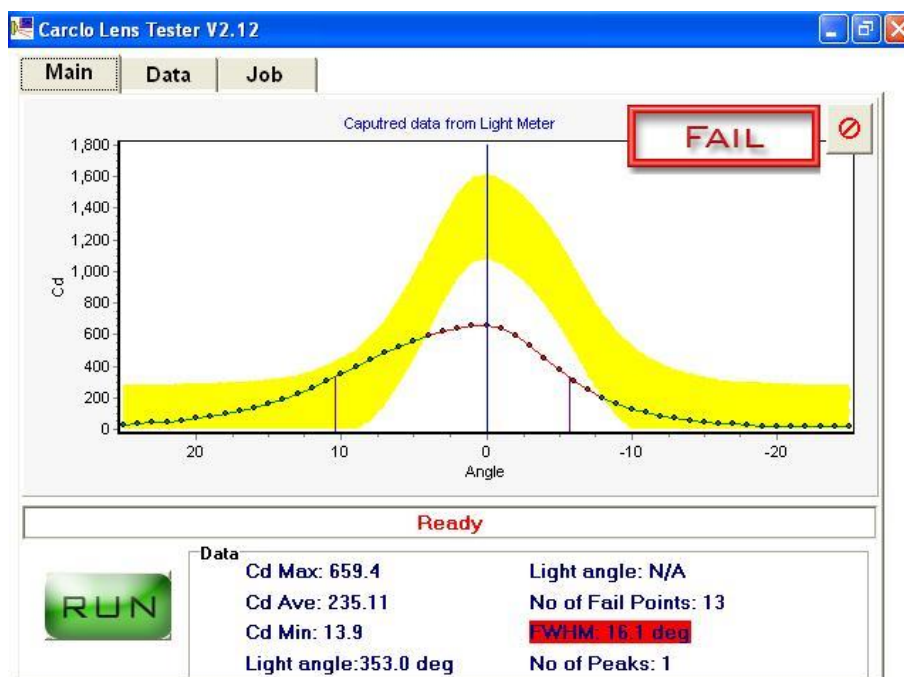
Obr. 55 Vyhodnocení vzorku optiky s vložkou DP5 podle optiky 10393

- Vzorek DP6 prošel ověřením pro optiku 10393 lépe (obr. 56), než vzorek DP5.



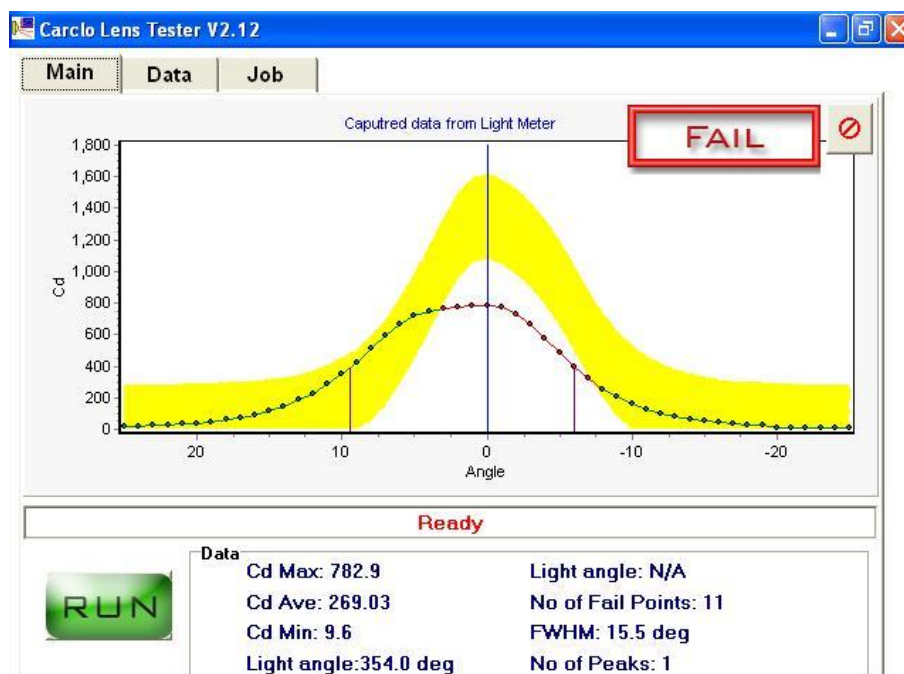
Obr. 56 Vyhodnocení vzorku optiky s vložkou DP6 podle optiky 10393

- Vzorek DP7 neprošel ověřením pro optiku 10392 (obr. 57), hodnota osvětlení byla stále nízká stejně jako v pokusu 1.



Obr. 57 Vyhodnocení vzorku optiky s vložkou DP7 podle optiky 10392

- Vzorek DP8 neprošel ověřením pro optiku 10392 (obr. 58), hodnota osvětlení byla vyšší než u vzorku DP7, ale stále byla moc nízká.



Obr. 58 Vyhodnocení vzorku optiky s vložkou DP8 podle optiky 10392

Podrobnější analýzu vyhodnocení vzorků uvádí kapitola 9 (diskuze).

## 8 EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

V celkové ceně na výrobu vložek je největší položkou cena materiálu. Vybrané slitiny Inconel 600 a Nickel 200 jsou v omezeném množství k dostání u specializovaných tuzemských dodavatelů. Nejvhodnější dostupný polotovár pro výrobu vložek je například tyč o průměru 30 mm v nejmenší délce 2000 mm od firmy Bibus metals s.r.o. Cena jedné ocelové tyče se pohybuje kolem 20 000 Kč. [23]

Další položkou je samotná výroba vložky, která se skládá z výroby polotovaru vložky a výroby požadované textury. Obě tyto operace byly prováděny elektroerozivně. Cena elektroerozivního obrábění se pohybuje od 250 Kč/hod až po 1500 Kč/hod.

Celkové náklady na výrobu jedné vložky jsou shrnuty v tabulce 8.1.

**Tab. 8.1 Celkové náklady na výrobu 1 vložky**

Cena polotovaru	20 000 Kč		
Drátové řezání	320 Kč/hod	Čas operace 1,5h	480 Kč
Výroba textury	1000 Kč/hod	Čas operace 1h	1 000 Kč
Doprava	450 Kč		
<b>Cena 1 vložky</b>	<b>21 930 Kč</b>		

## 9 DISKUZE

Na výrobu různých textur a dezénů se hojně využívají nekonvenční technologie a výrobou textur pro vstřikovací formy se zabývá mnoho společností, avšak každá si svoje technologické postupy dobře střeží. Bylo provedeno několik neúspěšných pokusů kontaktovat vývojové oddělení společnosti sídlící ve Velké Británii z důvodů konzultace používaných technologií na původní výrobu originálních vložek i z hlediska použitého materiálu. Z toho důvodu bylo nutné pokusit se zanalyzovat původní strukturu a použitý materiál. K tomu velmi dobře posloužil rastrovací elektronový mikroskop, kdy bylo možné analyzovat strukturu s velkým přiblížením.

Při zjišťování chemického složení materiálu bylo objeveno, že strana vložky s texturou má na sobě povlak slitiny na bázi uhlíku, kyslíku, zlata a niklu a základní materiál je ze slitiny s vysokým obsahem niklu, kobaltu a uhlíku. Nalézt vhodný materiál se stejným chemickým složením pro výrobu náhradní vložky není vůbec snadné.

Na základě analýzy textury elektronovým mikroskopem a měření drsnosti byla vybrána technologie elektroerozivního obrábění. S dostupným materiálem, který však měl odlišné chemické složení, byl potom proveden pokus o vytvoření podobné textury.

V prvním pokusu byly vytvořeny dvě vložky s texturou frosted 5° a dvě vložky s texturou frosted 20°. Vložky byly vsazeny do formy a bylo vylisováno několik kusů optik, na kterých byla ověřena správnost každé z textur pomocí přístroje ILMA. Bylo zjištěno, že ani jeden z povrchů v pokusu 1 neodpovídal vzorovému dílu. V případě textury frosted 5°, která byla ověřována na optice 10392, došlo na výlisku k přílišnému zmatnění a světlo prostupující optikou nedosahovalo potřebných parametrů osvětlení. V případě textury frosted 20° ověřované na díle 10393, byly výsledky lepší, maximální hodnota osvětlení ale byla zhruba o třetinu vyšší, než požadovala specifikace, tedy povrch byl zmatněn málo.

Proto byl proveden druhý pokus vytvoření vložek, kdy byly upraveny parametry obrábění a opět byly navzorovány dvě vložky s texturou frosted 5° a dvě s texturou frosted 20°. Pro testování byly opět vylisovány potřebné optiky a ověřeny pomocí přístroje ILMA. Ani jedna z vložek s texturou frosted 5° pro optiky 10392 neprošla ověřením, u jedné z nich (DP8) se hodnota osvětlení oproti prvnímu pokusu nepatrně zvýšila, ale pořád zůstala zhruba na poloviční hodnotě než je u vzorové optiky. Lépe dopadly vložky s texturou frosted 20°, které pro optiku 10393 prošly ověřením. U vložky DP5 byla hodnota osvětlení v toleranci, ale byla o zhruba 50 Cd nižší než u vzorového dílu. Vložka DP6 dopadla ještě lépe, hodnota osvětlení nejvíce odpovídala vzorovému dílu. Tyto výsledky potvrdilo i to, že hodnota dána jako FWHM byla pro obě vložky v toleranci.

Vložky DP5 a DP6 s texturou frosted 20° by mohly být vhodnou náhradou za původní poničené vložky. Aby bylo možné tuto výměnu provést, je nutné požádat zákazníka z Velké Británie o povolení. Z toho důvodu k němu byly expresně poslány vzorky optik vylisované pomocí vložek DP5 a DP6 a čeká se na jejich případné schválení.



## 9.1 Návrhy dalších možných kroků

Dalšími kroky, jak ověřit správnost povrchu na optice 10393, by bylo vyrobit stejným způsobem vložky i do jiných forem pro optiky, které mají stejný povrch, nabízí se vložky frosted 20° do forem CT870119 a CT870120.

Pro dosažení lepších výsledků i u textury forsted 5° se nabízí hned několik řešení:

- Upravit znovu obráběcí proces na elektroerozivní hloubičce, a dosáhnout tak lepších parametrů textury a tedy i optiky.
- Pokud by upravení obráběcího procesu nepomohlo, nabízí se možnost použití jiného materiálu, například původně vybraný materiál Inconel 600 nebo Nickel 200.
- Pro dosažení lepší trvanlivosti vložek i pro vylepšení parametrů textury je možné je povlakovat stejně jako originální vložky některým vhodným druhem povlaku například na bázi niklu.

## ZÁVĚR

Vstřikování plastů v dnešní době patří k hojně využívaným technologiím. Proto je důležitým úkolem každé lisovny správně pečovat o používané formy, udržovat je v dobrém stavu během výroby a skladovat nepoužívané formy ve vhodných podmínkách. Na opravu forem, u kterých došlo k poškození určitých částí, se hojně využívá metod elektroerozivního obrábění zejména elektroerozivního hloubení a drátového řezání.

Tato diplomová práce byla zaměřena na nalezení metody výroby vložky formy s požadovaným povrchem jako náhrady za poškozenou původní vložku. Původní vložka byla podrobena analýze na rastrovacím elektronovém mikroskopu z hlediska použitého materiálu a z hlediska požadované textury povrchu. Textura byla dále zkoumána z hlediska její drsnosti a to dvěma metodami – optickou a dotykovou. Získaná data byla podkladem pro vytvoření nových vzorků vložek do formy s danou texturou, které byly následně ověřovány na výliscích z konkrétní formy.

Celkem bylo vyrobeno osm vzorků textur. Podařilo se najít dvě metody, kterými lze vytvořit danou texturu na vložce tak, aby následný výlisek (optika) splňoval dané specifikace. Ověření těchto vložek a schválení jako náhrady za původní originální nyní závisí na potvrzení od zákazníka.

Tato práce může být podkladem pro hledání dalších možností výroby konkrétních vložek s požadovanou texturou.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MÁDL, J., KAFKA, J., VRABEC, M., DVOŘÁK, R. *Technologie obrábění – 3. díl*. 1.vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT. 2002. ISBN 80-01-02091-6.
2. KOČMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
3. COPTTEL. *Nekonvenční metody obrábění*. [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://copttel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=33789&instance=2>
4. Fyzikální (nekonvenční) technologie obrábění. [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.strojnilyceum.wz.cz/maturita/tep/tep5.pdf>
5. ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ Zuzana. *Nekonvenční metody obrábění. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>.
6. HUMAR, Antonín. *Technologie i - Technologie obrábění - 3. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2004. 94 stran. [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
7. KALENDA, Jan. *Elektroerozivní obrábění při výrobě tvarových dutin*. Brno 2009. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 63 s., příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička Ph.D.
8. *Nekonvenční technologie obrábění*. [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.techstroj.g6.cz/T/T20.pdf>
9. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
10. KRUTINA, Jiří. *Laserové technologie v průmyslu. MM Průmyslové spektrum*. [online]. 2010. [cit. 2017-5-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-v-prumyslu.html>
11. LINTECH: *Laserové gravírování textur a dezénů*. [online]. [cit. 2017-5-3]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-gravirovani-textur-a-dezenu>
12. HRBÁČEK, P. *Problematika bezkontaktního měření drsnosti pomocí konfokálního mikroskopu*. [online]. [cit. 2017-5-3]. Dostupné z: <https://www.opi.zcu.cz/download/drsnost.pdf>
13. AICHLER, Jaroslav. *Systém managementu měření*. Brno 2009. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 55s., 1 příloha. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Koška, Ph.D.
14. DOLÁKOVÁ, Ester. *Vliv materiálů s různou texturou povrchu na charakteristiky promítaných světelných svazků reflektorů*. Olomouc 2013. Diplomová práce. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 64s., 5 příloh. Vedoucí diplomové práce RNDr. Ing. Jan Podloucký
15. ČSN EN ISO 4287 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu

16. VDI 3400: *Making by EDM or Sandblasting or Etching on mold cavity surface to be achieved*. [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.vdi3400.com/>
17. CARCLO OPTICS [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.carclo-optics.com/>
18. CEPLANT: *R&D Centre for Low-Cost Plasma and Nanotechnology Surface Modifications*. [online]. [cit. 2017-5-18]. Dostupné z: <http://www.ceplant.cz/>
19. NEONICKEL [online]. [cit. 2017-5-18]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cS/>
20. SPECIALMETALS [online]. [cit. 2017-5-18]. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/>
21. CARCLO OPTICS: *Guide to choosing secondary optics*. [online]. [cit. 2017-5-20]. Dostupné z: [http://www.west-l.ru/uploads/tdpdf/smbarthelme\\_optiken-lumiled\\_en.pdf](http://www.west-l.ru/uploads/tdpdf/smbarthelme_optiken-lumiled_en.pdf)
22. UL PROSPECTOR [online]. [cit. 2017-5-20]. Dostupné z: <https://plastics.ulprospector.com/>
23. BIBUS METALS [online]. [cit. 2017-5-22]. Dostupné z: <https://www.bibusmetals.cz/materialy/nikl-niklove-slitiny/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
BSE	-	Detektor zpětně odražených elektronů (u SEM)
CAD	-	Computer Aided Design - počítačem podporované navrhování
CAM	-	Computer Aided Manufacturing - počítačem podporovaná výroba
CLM	-	Confocal Laser Microscope - kofokální laserový mikroskop
CNC	-	Computer Numeric Control - číslicové řízení počítačem
LED	-	Light Emitting Diode - světlo vyzařující dioda
$R_a$	$\mu\text{m}$	střední aritmetická úchylka profilu
$R_z$	$\mu\text{m}$	největší výška profilu
SE	-	detektor sekundárních elektronů (u SEM)
SEM	-	Scanning Electron Microscope - rastrovací elektronový mikroskop
SRT	-	Surface Roughness Tester - měřič drsnosti povrchu
VDI	-	Stupnice drsnosti u elektroerozivního obrábění

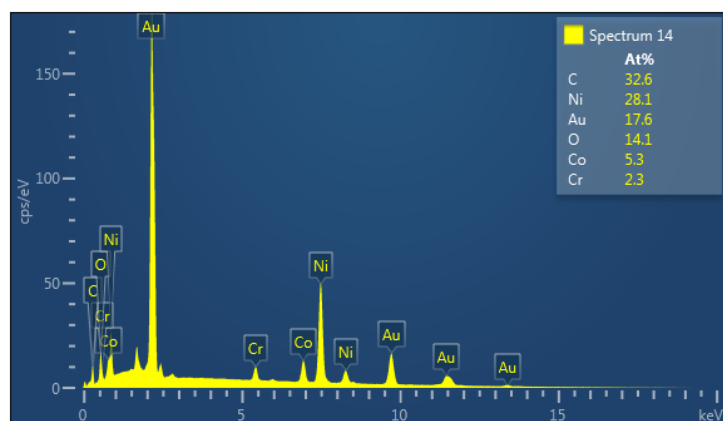
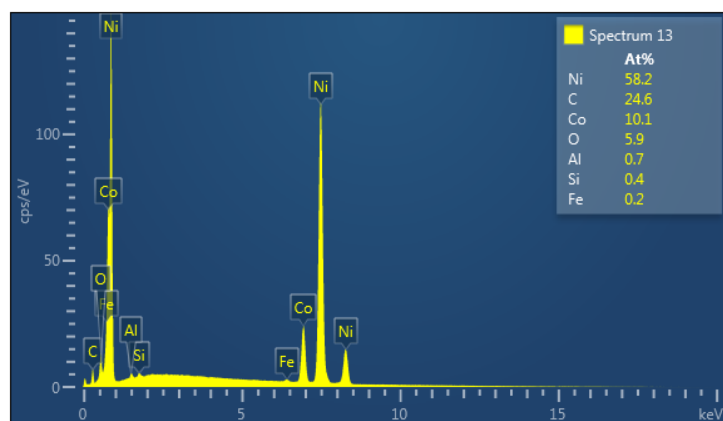
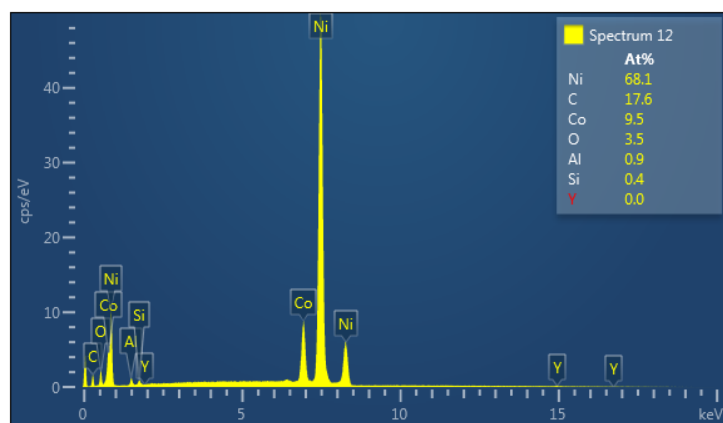
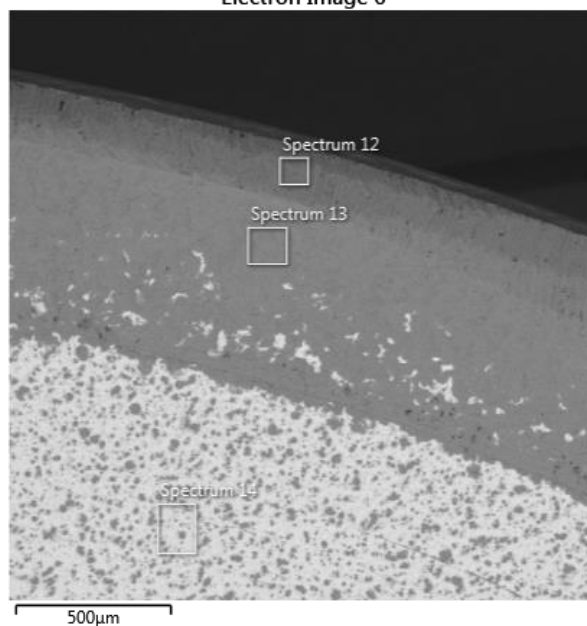


**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Snímky ze SEM a sondy EDX vložky frosted 5°
- Příloha 2 Materiálový list INCONEL alloy 600 [20]
- Příloha 3 Materiálový list NICKEL 200 [20]
- Příloha 4 Report z konfokálního mikroskopu LEXT vložky frosted 20°
- Příloha 5 Report z konfokálního mikroskopu LEXT vložky frosted 5°
- Příloha 6 Výkres optiky 10392 [17]
- Příloha 7 Výkres optiky 10393 [17]
- Příloha 8 Materiálový list polykarbonátu LEXAN LS2 [22]

Electron Image 6

Příloha 1



INCONEL® (nickel-chromium-iron) alloy 600 (UNS N06600/W.Nr. 2.4816) is a standard engineering material for applications which require resistance to corrosion and heat. The alloy also has excellent mechanical properties and presents the desirable combination of high strength and good workability.

The limiting chemical composition of INCONEL alloy 600 is shown in Table 1. The high nickel content gives the alloy resistance to corrosion by many organic and inorganic compounds and also makes it virtually immune to chloride-ion stress-corrosion cracking. Chromium confers resistance to sulfur compounds and also provides resistance to oxidizing conditions at high temperatures or in corrosive solutions. The alloy is not precipitation hardenable; it is hardened and strengthened only by cold work.

The versatility of INCONEL alloy 600 has led to its use in a variety of applications involving temperatures from cryogenic to above 2000°F (1095°C).

The alloy is used extensively in the chemical industry for its strength and corrosion resistance. Applications include heaters, stills, bubble towers and condensers for processing of fatty acids; evaporator tubes, tube sheets and flaking trays for the manufacture of sodium sulfide; and equipment for handling abietic acid in the manufacture of paper pulp.

The alloy's strength and oxidation resistance at high temperatures make it useful for many applications in the heat-treating industry. It is used for retorts, muffles, roller hearths and other furnace components and for heat-treating baskets and trays.

In the aeronautical field, INCONEL alloy 600 is used for a variety of engine and airframe components which must withstand high temperatures. Examples are lockwire, exhaust liners and turbine seals.

INCONEL alloy 600 is used in the electronic field for such parts as cathode-ray tube spiders, thyatron grids, tube support members and springs.

The alloy is a standard material of construction for nuclear reactors. It has excellent resistance to corrosion by high-purity water, and no indication of chloride-ion stress-corrosion cracking in reactor water systems has been detected. For nuclear applications, the alloy is produced to exacting specifications and is designated INCONEL alloy 600T.

**Table 1** - Limiting Chemical Composition, %

Nickel (plus Cobalt).....	72.0 min.
Chromium.....	14.0-17.0
Iron.....	6.00-10.00
Carbon.....	0.15 max.
Manganese.....	1.00 max.
Sulfur.....	0.015 max.
Silicon.....	0.50 max.
Copper.....	0.50 max.

## Physical Constants and Thermal Properties

Some physical constants of INCONEL alloy 600 are given in Table 2. Thermal properties at low and high temperatures are listed in Table 3.

The modulus of elasticity in tension at various temperatures is shown in Table 4.

Measurements of total hemispherical emissivity and total normal emissivity are shown in Table 5.

The values for physical constants and thermal properties reported here are typical but are not suitable for specification use.

**Table 2** - Physical Constants

Density, lb/in <sup>3</sup> .....	0.306
Mg/m <sup>3</sup> .....	8.47
Melting Range, °F.....	2470-2575
°C.....	1354-1413
Specific Heat, Btu/lb-°F.....	0.106
J/kg-°C.....	444
Electrical Resistivity, ohm-circ mil/ft.....	620
μΩ-m.....	1.03
Curie Temperature, °F.....	-192
°C.....	-124
Permeability at 200 oersted (15.9 kA/m).....	1.010

## Mechanical Properties

As indicated by the nominal mechanical properties listed in Table 6, a broad range of strength and hardness is obtainable with INCONEL alloy 600, depending on form and condition. In the annealed condition, the alloy exhibits moderate yield strengths of 25,000 to 50,000 psi (172 to 345 MPa). Yield strengths in that range, combined with elongations of 55 to 35%, permit the alloy to be fabricated with little difficulty. Heavily cold-worked material, however, can have tensile strengths as high as 220,000 psi (1517 MPa).

Values for properties reported in this publication are typical but are not suitable for specification purposes unless stated as minimum or maximum.

Publication Number SMC-027  
Copyright © Special Metals Corporation, 2008 (Sept 08)

INCOLOY, INCOFLUX, INCONEL, INCO-WELD and 800HT are trademarks of the Special Metals Corporation group of companies.





## Nickel

Commercially pure or low-alloy nickel has characteristics that are useful in several fields, notably chemical processing and electronics. Nickel is highly resistant to various reducing chemicals and is unexcelled in resistance to caustic alkalies. Compared with nickel alloys, commercially pure nickel has high electrical and thermal conductivity. It also has a high Curie temperature and good magnetostrictive properties. Annealed nickel has a low hardness and good ductility and malleability. Those attributes, combined with good weldability, make the metal highly fabricable. Nickel has a relatively low work-hardening rate, but it can be cold worked to moderately high strength levels while maintaining ductility.

Included in this publication are Nickel 200 and Nickel 201.

## Nickel 200

Nickel 200 (UNS N02200/W.Nr. 2.4060 & 2.4066) is commercially pure (99.6%) wrought nickel. It has good mechanical properties and excellent resistance to many corrosive environments. Other useful features of the alloy are its magnetic and magnetostrictive properties, high thermal and electrical conductivities, low gas content and low vapor pressure. Chemical composition is shown in Table 1.

The corrosion resistance of Nickel 200 makes it particularly useful for maintaining product purity in the handling of foods, synthetic fibers, and caustic alkalies; and also in structural applications where resistance to corrosion is a prime consideration.

Other applications include chemical shipping drums, electrical and electronic parts, aerospace and missile components.

**Table 1** - Limiting Chemical Composition, %

Nickel (plus cobalt) .....	99.0 min.
Copper .....	0.25 max.
Iron .....	0.40 max.
Manganese .....	0.35 max.
Carbon .....	0.15 max.
Silicon .....	0.35 max.
Sulfur .....	0.01 max.

## Physical Properties

Physical constants and thermal properties are shown in Tables 2 and 3. Values for modulus of elasticity at various temperatures are in Table 4. The elastic properties were determined dynamically on annealed material.

**Table 2** - Physical Constants

Density, lb/in <sup>3</sup> .....	0.321
g/cm <sup>3</sup> .....	8.89
Melting Range, °F .....	2615-2635
°C .....	1435-1446
Specific Heat, Btu/lb·°F .....	0.109
J/kg·°C .....	456
Curie Temperature, °F .....	680
°C .....	360

**Table 3** - Thermal Properties of Annealed Nickel 200

Temperature	Coefficient of Expansion <sup>a</sup>	Thermal Conductivity	Electrical Resistivity
°F	10 <sup>-6</sup> in/in·°F	Btu·in/ft <sup>2</sup> ·h·°F	ohm·circ mil/ft
-423	4.7	—	—
-300	5.8	—	16
-200	6.2	533	26
-100	6.3	516	36
0	—	499	48
70	—	487	58
200	7.4	463	76
400	7.7	426	113
600	8.0	389	164
800	8.3	389	204
1000	8.5	404	228
1200	8.7	421	248
1400	8.9	437	269
1600	9.1	455	289
1800	9.3	472	306
2000	9.5	—	323
°C	µm/m·°C	W/m·°C	µΩ·m
-200	10.1	—	—
-100	11.3	75.5	0.050
20	—	70.3	0.096
100	13.3	66.5	0.130
200	13.9	61.6	0.185
300	14.2	56.8	0.260
400	14.8	55.4	0.330
500	15.3	57.6	0.365
600	15.5	59.7	0.400
700	15.8	61.8	0.430
800	16.2	64.0	0.460
900	16.6	66.1	0.485
1000	16.9	68.2	0.510
1100	17.1	—	0.540

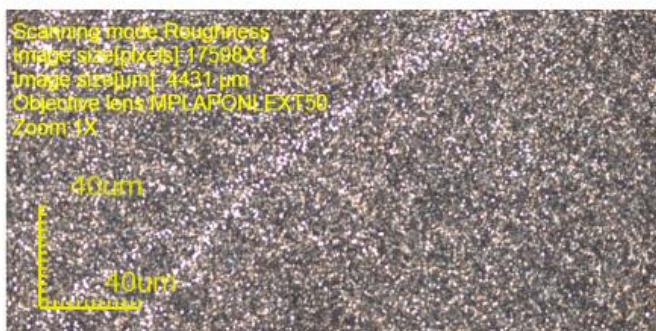
<sup>a</sup> Mean coefficient of linear expansion between 70°F (21°C) and temperature shown.







# Report Title

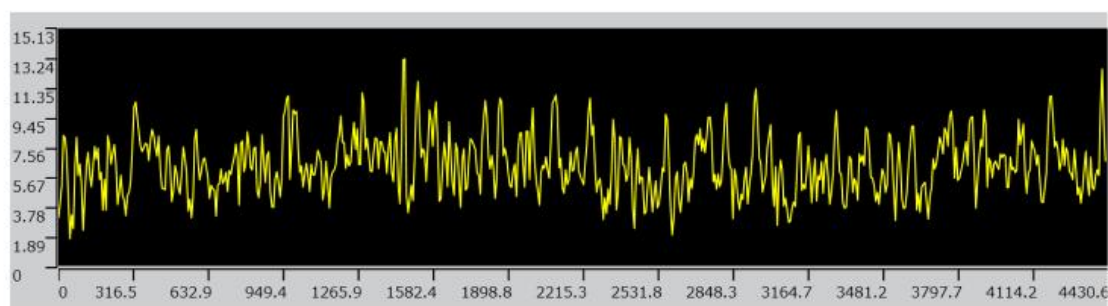


User ID: GUEST  
User name: GUEST  
Description: GUEST USER

170316\_125123  
[Acquisition parameters]  
Scanning mode: Roughness  
Image size[pixels]: 17598X1  
Image size[µm]: 4431 µm  
Objective lens: MPLAPONLEXT50x  
Zoom: 1x  
DIC: Off

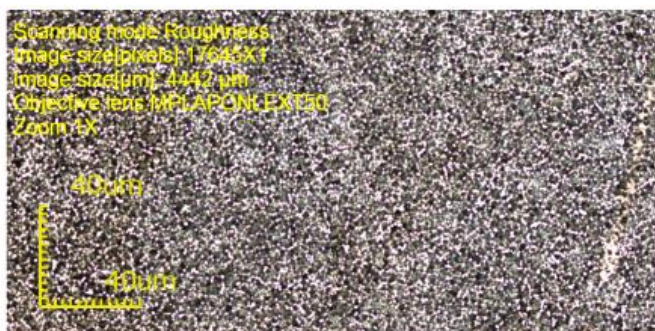
Comment

No.	Result	Rq[µm]	Rv[µm]	Rd[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	Rq[µm]	Rsk	Rku	Rsm[µm]	Rdq[°]	Rdc[µm]	Rmr[%]	Rz[µm]	Ac[µm]	As[µm]	At[µm]	File name
1		4.921	3.790	8.710	5.149	11.402	1.433	1.769	0.342	2.642	63.146	36.833	3.038	100.000	8.482	800.000	-	-	170316_1251
Count		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Average		4.921	3.790	8.710	5.149	11.402	1.433	1.769	0.342	2.642	63.146	36.833	3.038	100.000	8.482				
Min.		4.921	3.790	8.710	5.149	11.402	1.433	1.769	0.342	2.642	63.146	36.833	3.038	100.000	8.482				
Max.		4.921	3.790	8.710	5.149	11.402	1.433	1.769	0.342	2.642	63.146	36.833	3.038	100.000	8.482				
Range		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
σ		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
3σ		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
Tolerance		Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	
Upper tolerance		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Standard		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Lower tolerance		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				





# Report Title

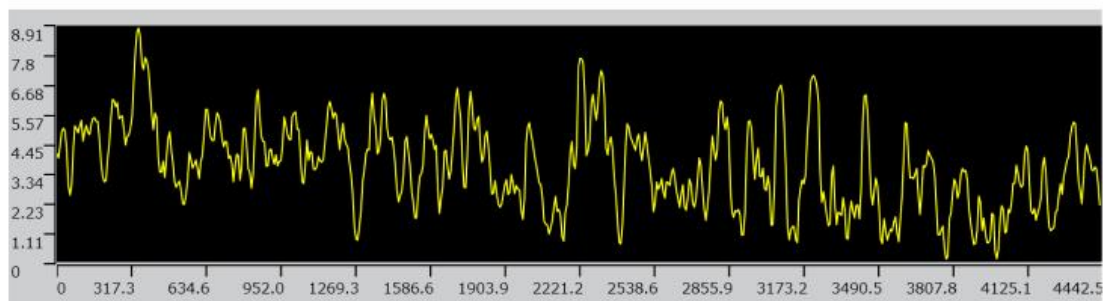


User ID: GUEST  
User name: GUEST  
Description: GUEST USER

170316\_124019  
[Acquisition parameters]  
Scanning mode: Roughness  
Image size[pixels]: 17645X1  
Image size[µm]: 4442 µm  
Objective lens: MPLAPONLEXT50x  
Zoom: 1x  
DIC: Off

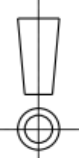
Comment

No.	Result	Rq[µm]	Rx[µm]	Rz[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	Rg[µm]	Rsk	Rku	Rsm[µm]	Rdq[°]	RSc[µm]	Rmr[%]	Rzjas[µm]	λc[µm]	λs[µm]	kl[µm]	File name
✓ 1		3.509	2.860	6.369	3.377	7.331	1.102	1.377	0.352	3.046	112.306	15.891	2.227	100.000	5.159	800.000	-	-	170316_124019
Count		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Average		3.509	2.860	6.369	3.377	7.331	1.102	1.377	0.352	3.046	112.306	15.891	2.227	100.000	5.159				
Min.		3.509	2.860	6.369	3.377	7.331	1.102	1.377	0.352	3.046	112.306	15.891	2.227	100.000	5.159				
Max.		3.509	2.860	6.369	3.377	7.331	1.102	1.377	0.352	3.046	112.306	15.891	2.227	100.000	5.159				
Range		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
σ		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
3σ		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
Tolerance		Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Upper tolerance		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Standard		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Lower tolerance		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				

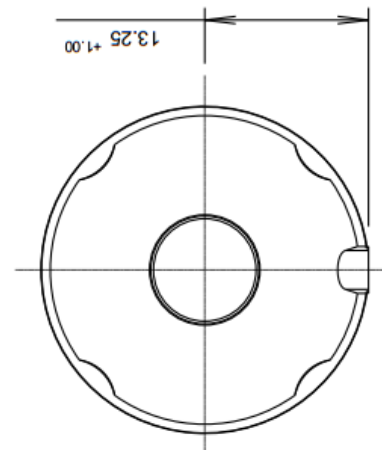
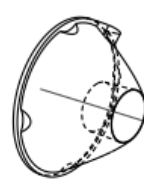
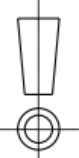
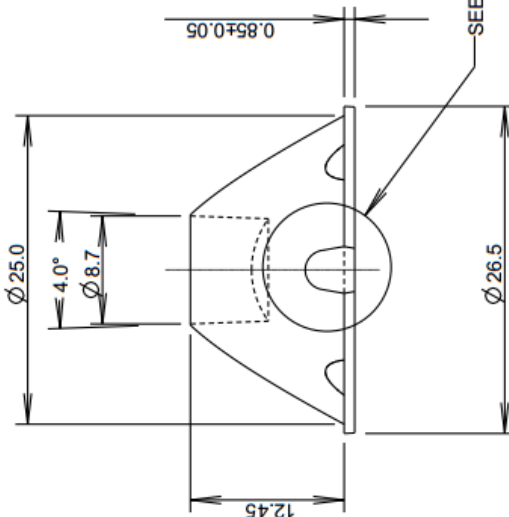
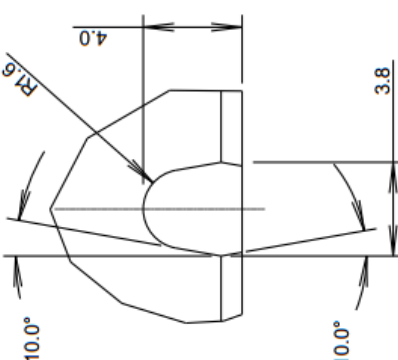




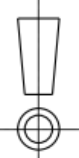
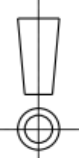
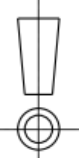
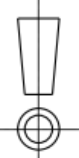
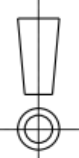
[illegible]

ISS.		DATE	E.C.N.	DESCRIPTION		© 2008 CARCLO ALL DIMENSIONS IN mm				1	
2		24-Jul-08		PIN DIA CHANGED FROM 9.0 TO 8.7 TIR SURFACE RE-OPTIMISED						2	


  

				<p>SCALE 1:1 GENERAL VIEW</p>		<p>CUSTOMER DRAWING</p>				3	
				<p>DETAIL A SCALE 4:1</p>		<p>MATERIAL: POLYCARBONATE</p>				4	

										5	
<p>1</p>		<p>2</p>		<p>3</p>		<p>4</p>		<p>5</p>		6	

		<p>CARCLO TECHNICAL PLASTICS (SLOUGH) LTD. 111 BUCKINGHAM AVE, SLOUGH SL1 4PF, ENGLAND</p>		<p>TEL: +44 1753 575011 FAX: +44 1753 811359 e-mail: design@ctpcoil.co.uk</p>		<p>GENERAL TOLERANCES (UNLESS STATED)</p>		<p>CUSTOMER</p>		7	
<p>LINEAR</p>		<p>ANGULAR</p>		<p>X +/- 0.25</p>		<p>X +/- 1°</p>		<p>X.X +/- 0.1</p>		<p>X.XX +/- 0.05</p>	
<p>26.5mm OPTIC 0.8mm OFFSET MEDIUM FROSTED</p>		<p>DRAWN</p>		<p>DATE</p>		<p>M.K.</p>		<p>2-June-08</p>		8	
<p>SCALE</p>		<p>COIL PART No.</p>		<p>2:1</p>		<p>10393</p>		<p>SIZE</p>		<p>COIL DRG. No.</p>	
<p>A4</p>		<p>60509</p>		<p>1 OF 1</p>		<p>SHEET</p>		<p>1 OF 1</p>		9	

LEXAN™ LS2 resin  
Polycarbonate  
SABIC Innovative Plastics Europe

PROSPECTOR®  
www.ulprospector.com

Technical Data

Product Description			
LEXAN LS2 is a medium viscosity grade especially designed for applications with high optical requirements in terms of clarity and light transmission.			
General			
Material Status	• Commercial: Active		
Literature <sup>1</sup>	• Technical Datasheet		
Search for UL Yellow Card	• SABIC Innovative Plastics Europe		
	• LEXAN™		
Availability	• Europe		
Features	• Good Optical Properties • High Clarity • Medium Viscosity		
RoHS Compliance	• RoHS Compliant		
Processing Method	• Injection Molding		
Physical			
Density	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
	1.20 g/cm³	1.20 g/cm³	ISO 1183
Melt Volume-Flow Rate (MVR) (300°C/1.2 kg)	0.732 in³/10min	12.0 cm³/10min	ISO 1133
Molding Shrinkage - Flow <sup>3</sup>	5.0E-3 to 7.0E-3 in/in	0.50 to 0.70 %	Internal Method
Water Absorption			
Saturation, 73°F (23°C)	0.35 %	0.35 %	ISO 62
Equilibrium, 73°F (23°C), 50% RH	0.15 %	0.15 %	
Mechanical			
	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Modulus	341000 psi	2350 MPa	ISO 527-2/1
Tensile Stress			
Yield	9140 psi	63.0 MPa	ISO 527-2/50
Break	10200 psi	70.0 MPa	
Tensile Strain			
Yield	6.0 %	6.0 %	ISO 527-2/50
Break	120 %	120 %	
Flexural Modulus <sup>4</sup>	334000 psi	2300 MPa	ISO 178
Flexural Stress <sup>4,5</sup>	131000 psi	90.0 MPa	ISO 178
Taber Abrasion Resistance			
1000 Cycles, 1000 g, CS-17 Wheel	10.0 mg	10.0 mg	Internal Method
Impact			
	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Charpy Notched Impact Strength <sup>6</sup>			
-22°F (-30°C)	6.7 ft-lb/in²	14 kJ/m²	ISO 179/1eA
73°F (23°C)	35 ft-lb/in²	73 kJ/m²	
Charpy Unnotched Impact Strength <sup>6</sup>			
-22°F (-30°C)	No Break	No Break	ISO 179/1eU
73°F (23°C)	No Break	No Break	
Notched Izod Impact Strength <sup>7</sup>			
-22°F (-30°C)	5.7 ft-lb/in²	12 kJ/m²	ISO 180/1A
73°F (23°C)	33 ft-lb/in²	70 kJ/m²	
Unnotched Izod Impact Strength <sup>7</sup>			
-22°F (-30°C)	No Break	No Break	ISO 180/1U
73°F (23°C)	No Break	No Break	
Hardness			
	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Ball Indentation Hardness (H 358/30)	13800 psi	95.0 MPa	ISO 2038-1



LEXAN™ LS2 resin  
Polycarbonate  
SABIC Innovative Plastics Europe

PROSPECTOR®  
www.ulprospector.com

Thermal			
	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Heat Deflection Temperature <sup>a</sup>			
66 psi (0.45 MPa), Unannealed, 3.94 in (100 mm) Span	277 °F	136 °C	ISO 75-2/Be
264 psi (1.8 MPa), Unannealed, 3.94 in (100 mm) Span	257 °F	125 °C	ISO 75-2/Ae
Vicat Softening Temperature			
-	286 °F	141 °C	ISO 306/B50
-	288 °F	142 °C	ISO 306/B120
Ball Pressure Test (257°F (125°C))	Pass	Pass	IEC 60695-10-2
CTE - Flow (73 to 176°F (23 to 80°C))	3.9E-5 in/in/°F	7.0E-5 cm/cm/°C	ISO 11359-2
Thermal Conductivity	1.4 Btu-in/hr-ft²-F	0.20 W/mK	ISO 8302
RTI Elec	266 °F	130 °C	UL 746
RTI Imp	257 °F	125 °C	UL 746
RTI Str	257 °F	125 °C	UL 746
<b>Electrical</b>			
	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Surface Resistivity	> 1.0E+15 ohms	> 1.0E+15 ohms	IEC 60093
Volume Resistivity	> 1.0E+15 ohms-cm	> 1.0E+15 ohms-cm	IEC 60093
Electric Strength	380 V/mil	15 kV/mm	IEC 60243-1
0.0394 in (1.00 mm) <sup>9</sup>	430 V/mil	17 kV/mm	
0.126 in (3.20 mm), in Oil			
Relative Permittivity			
50 Hz	2.70	2.70	IEC 60250
60 Hz	2.70	2.70	
1 MHz	2.70	2.70	
Dielectric Factor			
50 Hz	1.0E-3	1.0E-3	IEC 60250
60 Hz	1.0E-3	1.0E-3	
1 MHz	0.010	0.010	
<b>Flammability</b>			
	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Flame Rating			
0.030 in (0.75 mm)	HB	HB	UL 94
0.12 in (3.0 mm)	HB	HB	
Glow Wire Flammability Index			
0.04 in (1.0 mm)	1560 °F	850 °C	IEC 60695-2-12
Oxygen Index	25 %	25 %	ISO 4589-2
<b>Optical</b>			
	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Refractive Index	1.586	1.586	ISO 489
Transmittance (100 mil (2540 µm))	88.0 to 90.0 %	88.0 to 90.0 %	ASTM D1003
Haze (100 mil (2540 µm))	< 0.80 %	< 0.80 %	ASTM D1003
<b>Injection</b>			
	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	
Drying Temperature	248 °F	120 °C	
Drying Time	2.0 to 4.0 hr	2.0 to 4.0 hr	
Suggested Max Moisture	0.020 %	0.020 %	
Hopper Temperature	140 to 176 °F	60 to 80 °C	
Rear Temperature	500 to 536 °F	260 to 280 °C	
Middle Temperature	518 to 554 °F	270 to 290 °C	
Front Temperature	536 to 590 °F	280 to 310 °C	
Nozzle Temperature	518 to 554 °F	270 to 290 °C	
Processing (Melt) Temp	536 to 590 °F	280 to 310 °C	
Mold Temperature	176 to 230 °F	80 to 110 °C	

